

Multimodale Verarbeitung hochauflösender SAR Daten

Dr.-Ing. Andreas Reigber

Habilitationsschrift an der Fakultät IV
- Elektrotechnik und Informatik -
der Technischen Universität Berlin

Lehrgebiet:
Fernerkundung und digitale Bildverarbeitung

Eröffnung des Verfahrens: 17. Oktober 2007
Verleihung der Lehrbefähigung: 13. Februar 2008

Habitationsausschuss:
Prof. Dr. Christian Boit (Vorsitz)
Prof. Dr. Olaf Hellwich
Prof. Dr. Thomas Sikora
Prof. Dr. Heino Henke

Gutachter:
Prof. Dr. Olaf Hellwich (TU Berlin)
Prof. Dr. Wolfgang-Martin Boerner (UIC Chicago)

Berlin, 2008

D 83

**Sicher ist, dass nichts sicher ist.
Selbst das nicht.**

– Joachim Ringelnatz (1883-1934)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	SAR Prozessierung	13
2.1	Grundlagen	13
2.1.1	Das Auflösungsvermögen eines SAR Sensors	13
2.1.2	Das SAR Signal	15
2.2	Prozessierungsmethoden	18
2.2.1	Bildfokussierung über Matched Filter	18
2.2.2	Multilooking / Bildung von Subaperturen	21
2.2.3	Bewegungskompensation	23
2.2.4	Moderne Algorithmen	25
2.2.5	Wellenzahlprozessierung	27
2.3	Der erweiterte Wellenzahlprozessor	31
2.3.1	Das modifizierte Stolt-Mapping	31
2.3.2	Bewegungskompensation 3. Ordnung	35
2.3.3	Winkelabhängigkeit der Bewegungskompensation	38
2.3.4	Experimentelle Ergebnisse	40
2.4	Schlussfolgerungen	45
3	SAR Polarimetrie	47
3.1	Grundlagen	47
3.1.1	Konzepte der SAR Polarimetrie	47
3.1.2	Klassifikation polarimetrischer Daten	52
3.2	Anisotrope polarimetrische Rückstreuung	58
3.2.1	Azimutale Variationen der polarimetrischen Rückstreuung	59
3.2.2	Maximum-Likelihood Detektion nicht-stationärer Objekte	61
3.2.3	Korrektur nicht-stationärer Rückstreuung	64
3.3	Nachbarschaftsgestützte polarimetrische Klassifikation	67
3.3.1	Klassifizierung über Expectation Maximisation	67
3.3.2	Probabilistische Relaxation der Klassen	70
3.3.3	Experimentelle Ergebnisse	73
3.4	Schlussfolgerungen	78
4	SAR Interferometrie	81
4.1	Grundlagen	81
4.1.1	Konzepte der SAR Interferometrie	81
4.1.2	Differentielle SAR Interferometrie	86
4.2	Flugzeuggestützte SAR Interferometrie	87
4.2.1	Effekte von Restbewegungsfehlern	88
4.2.2	Kopplung zwischen Bewegungsfehlern und Topographie	90

4.2.3	Skalierung der Basislinie	93
4.3	Verbesserte Datenverarbeitung in der flugzeuggestützten SAR Interferometrie . .	94
4.3.1	Topographieabhängige Bewegungskompensation	94
4.3.2	Schätzung der Basislinienfehler	98
4.3.3	Konvertierung von Phase zu Höhe	104
4.3.4	Experimentelle Ergebnisse	105
4.4	Schlussfolgerungen	108
5	Zusammenfassung und Ausblick	111
A	Literaturverzeichnis	113
B	Liste der Symbole und Abkürzungen	129
C	Abbildungsverzeichnis	133
D	Tabellenverzeichnis	137

1 Einleitung

Abbildende Radartechnik ist ein Fernerkundungsverfahren, welches das Ziel hat, von einer beobachteten Gegend eine hochaufgelöste Reflektivitätskarte im Mikrowellenbereich zu erzeugen. Erreicht wird dies durch Abstrahlung und Empfang von elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenbereich, typischerweise durch Sensoren, die auf Flugzeugen oder Satelliten montiert sind. Unter einer ganzen Reihe von Mikrowellensensoren hat sich in den letzten Jahren ein besonderes Interesse in *Radar mit synthetischer Apertur* (SAR) herausgebildet. Der Grund hierfür ist, dass das SAR als einziger Mikrowellensensor eine flächige Abbildung mit einer hohen räumlichen Auflösung, die durchaus mit der optischer Systeme vergleichbar ist, ermöglicht.

Die Entwicklungsgeschichte des Radars mit synthetischer Apertur begann bereits vor über 50 Jahren mit der Idee, die DOPPLER-Verschiebung des Radarsignals zu nutzen, um die Azimutauflösung des damals aktuellen *side-looking airborne radar* (SLAR) zu verbessern [215]. Zur Prozessierung der Daten war man, bis in die 1970er Jahre hinein, auf die Verwendung optischer, holographischer Verfahren angewiesen; erst danach war man in der Lage, mittels digitaler Datenverarbeitung hochaufgelöste SAR Aufnahmen in hoher Qualität zu erzeugen [10],[216]. Seitdem entwickelte sich die Fernerkundung mit SAR Sensoren rasant weiter, hin zu immer höheren Auflösungen und Aufnahmemodi. In den letzten 10 Jahren gewannen dabei vor allem die mehrkanalige SAR Modi stark an Bedeutung, wie z.B. multispektrales SAR [66], SAR Interferometrie [8] und SAR Polarimetrie [13]. Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit speziellen Datenverarbeitungstechniken solcher mehrkanaliger SAR Daten.

SAR Sensoren arbeiten im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums bei Wellenlängen zwischen wenigen Millimetern und mehreren Metern. Betrachtet man das Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre, so stellt man fest, dass bei Wellenlängen größer als etwa 1cm praktisch keine nennenswerte Absorption mehr auftritt. Dies gilt sowohl für die Luft selbst als auch für Wolken und kleinere Wassertropfen. SAR Aufnahmen lassen sich daher praktisch unabhängig von den aktuell herrschenden Wetterbedingungen generieren, wohingegen Wolken und Nebel für optische Systeme oft eine große Einschränkung darstellen. Als aktives System, das seine eigene Beleuchtung mitbringt, besteht weiterhin keinerlei Abhängigkeit von der jeweiligen Tageszeit. Zusammengefasst führen diese Punkte dazu, dass sich SAR Sensoren besonders gut für verlässliche und regelmäßige Beobachtungen eignen.

Der Informationsgehalt von Radaraufnahmen ist deutlich anders gelagert als der von optischen oder Infrarotsystemen. Während im optischen Bereich vor allem die molekulare Zusammensetzung des Objekts für die charakteristische Reflektivität des Objekts verantwortlich zeichnet, sind im Mikrowellenbereich vor allem die geometrische Form sowie die dielektrischen Eigenschaften für die Stärke der Rückstreuung von Bedeutung. In Radaraufnahmen tritt daher das Relief und morphologische Strukturen besonders deutlich hervor. Auch Änderungen in der Leitfähigkeit, z.B. durch unterschiedliche Bodenfeuchte, können so beobachtet werden. Aufgrund der Sensitivität auf dielektrische Eigenschaften können im Prinzip sogar Informationen über den Vegetationszustand gesammelt werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Radaraufnahmen ergibt sich aus den Ausbreitungseigenschaften von Mikrowellen: Durch ihre lange Wellenlänge sind Mikrowellen bis zu einem gewissen Grad in der Lage, in Vegetationsschichten, in Schnee und Eis und sogar in den Boden einzudringen [203]. Das Eindringvermögen hängt dabei von der Wellenlänge des Sensors, aber auch von den dielektrischen Eigenschaften und der Leitfähigkeit des Objekts ab. Kürzere Wellenlängen, wie das X-Band, werden stark gedämpft und daher vor allem von der Oberfläche reflektiert. In kürzeren Wellenlängen sammelt man daher in erster Linie Informationen über die oberen Schichten von Vegetation oder Boden. Längere Wellenlängen, wie L- oder P-Band, dringen hingegen oft tief in Vegetation ein. Rückstreuung in solchen Wellenlängen enthalten daher Anteile aus dem gesamten rückstreuenden Volumen.

An dieser Stelle zeigt sich bereits ein typisches Problem der Fernerkundung im allgemeinen: Die zu untersuchenden Objekte sind meist recht komplex, und ihre Eigenschaften wirken sich in vielerlei Weise auf das gemessene Bildergebnis aus. Ein Fernerkundungssensor liefert aber nur einen sehr niedrigdimensionalen Raum von Observablen, im Falle eines konventionellen SAR Sensors sogar nur einen einzigen Messwert. Es ist daher in vielen Fällen sehr schwierig, oder sogar unmöglich, aus dem gemessenen Bildergebnis auf den gesuchten Objektparameter zu schließen. Es besteht also ein Mehrdeutigkeitsproblem: Mehrere verschiedene Sätze von Objektparametern können zu exakt dem gleichem Satz an Observablen führen. Der einzige Weg dieses Problem zu umgehen, ist die Erhöhung der Dimensionalität des Sensors, also die Verwendung mehrerer unabhängiger Empfangskanäle. Thema dieser Arbeit sind spezielle sogenannte *multimodale* Verarbeitungstechniken, die für die korrekte Bearbeitung solcher multidimensionalen Datensätze notwendig sind. Es soll dabei insbesondere aufgezeigt werden, dass durch Hinzunahme weiterer Datendimensionen generell eine verbesserte Informationsextraktion erreicht, bzw. mit ihnen eine verbesserte Datenverarbeitung erzielt werden kann.

Generell ergeben sich in der SAR Fernerkundung vor allem folgende Möglichkeiten für multimodale Erweiterungen:

Multifrequentes SAR: Alle bislang betriebenen satellitengestützten SAR Systeme arbeiten nur in einem einzigen Band, besitzen also eine dedizierte zentrale Wellenlänge. Verwendet wird dabei meist das C-Band, wie z.B. bei den europäischen ERS-1, ERS-2 [4] und ENVISAT [119] und den kanadischen RADARSAT-1 [161] und RADARSAT-2 [125]. Es kommt aber auch L-Band, z.B. beim japanischen ALOS-PALSAR [99], und X-Band, wie bei in Kürze startenden TerraSAR-X [214], zum Einsatz. Prinzipiell stehen daher also SAR Daten in verschiedenen Wellenlängen zur Verfügung. Trotzdem sind solche inhomogenen Datenquellen als nicht ideal anzusehen, da unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte, sowie abweichende Bildauflösungen und Sensorcharakteristika zu beachten sind. Die einzige Ausnahme stellen die Shuttle Missionen SIR-C/X-SAR im Jahr 1994 (X-, C- und L-Band) [92] und SRTM im Jahr 2000 (X- und C-Band) [213] dar, bei denen zum ersten Mal aus dem Orbit multifrequente SAR Daten simultan aufgezeichnet wurden. Im Gegensatz dazu bieten die allermeisten heutzutage betriebenen flugzeuggestützten SAR Systeme die Möglichkeit mehrerer Wellenlängen. Zu nennen sind hier beispielsweise das E-SAR System des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (X-, C-, S-, L- und P-Band) [89], das französische RAMSES System von Onera (W-, Ka-, Ku-, X-, C-, S-, L- und P-Band) [45] oder das amerikanische AIRSAR System des JPLs (X-, C- und L-Band) [207].

Die Reflektivität im Mikrowellenbereich kann stark von der verwendeten Wellenlänge abhängen, da die Dielektrizitätskonstante vieler Materialien stark frequenzabhängig ist [203]. Auch die Oberflächenrauigkeit hat in verschiedenen Wellenlängen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Stärke der Rückstreuung [203]. Aus diesen Gründen erscheinen SAR Aufnahmen, die in un-

terschiedlichen Bändern angefertigt worden sind, oft sehr verschieden. Genau diese Unterschiede erlauben es mache Oberflächen oder Materialien zu trennen, die bei Betrachtung in nur einer Wellenlänge noch identisch erscheinen; dies lässt sich z.B. zu Klassifikationszwecken ausnutzen. Wie bereits zuvor erwähnt, ändert sich mit der Wellenlänge auch das Eindringvermögen der Mikrowellen. Es wird in verschiedenen Bändern also auch Informationen aus unterschiedlichen Schichten eines Volumens gewonnen; dies kann dazu benutzt werden um beispielsweise in Kombination mit interferometrischen Ansätzen Vegetationshöhen zu bestimmen [217][205].

Dadurch dass sich die verschiedenen Bänder im allgemeinen nicht spektral überlappen, sind multifrequente SAR Daten untereinander inkohärent. Die Datenverarbeitung der einzelnen Kanäle erfolgt daher in erster Linie unabhängig voneinander; erst zum Schluss werden die verschiedenen Aufnahmen kombiniert ausgewertet. In dieser Arbeit wird aus diesem Grund nicht weiter auf die Verarbeitung multifrequenter Daten eingegangen.

Polarimetrisches SAR: Die SAR Polarimetrie (PolSAR) ist eine weitere wichtige Möglichkeit, den Beobachtungsraum von SAR Sensoren zu erweitern. Elektromagnetische Wellen sind transversaler Natur und erlauben daher zwei orthogonale Schwingungsrichtungen. Dies gilt sowohl für den Sende- als auch für den Empfangskanal, man erhält also im Idealfall 4 unabhängige Messungen. Dies ist Gegenstand der Radarpolarimetrie, initiiert im Jahre 1948 durch G.W. Sinclair mit der Einführung des Konzepts der *Streumatrizen* [188]. Da Radarpolarimetrie deutlich höhere Hardwareanforderungen stellt, blieb sie lange nur ein theoretisches Konstrukt [90] [12], und ihr praktischer Nutzen wurde vor allem im zivilen Bereich lange nicht erkannt. Diese Situation änderte sich mit der Verfügbarkeit polarimetrischer SAR Daten verschiedener flugzeuggestützter SAR Systeme, wie beispielsweise dem AIRSAR oder dem E-SAR, sowie den beiden SIR-C/X-SAR Missionen, bei denen polarimetrische SAR Daten in mehreren Wellenlängen erzeugt wurden. Seitdem hat sich die SAR Polarimetrie zu einer etablierten Fernerkundungsmethode entwickelt, welche auch in zunehmenden Maße von den neuesten SAR Satelliten, wie dem kanadischen RADARSAT-2, dem japanischen ALOS-PALSAR und dem deutschen TerraSAR-X, unterstützt wird.

Eine besondere Eigenschaft der SAR Polarimetrie ist die prinzipielle Möglichkeit, verschiedenartige Rückstreumechanismen unterscheiden zu können. Dies kann erreicht werden, da die gemessenen polarimetrischen Signaturen stark vom jeweils aufgetretenen Streuprozess abhängen. Im Vergleich zum herkömmlichen einkanaligen SAR ergibt sich damit eine signifikante Verbesserung bei der Unterscheidung verschiedener Oberflächentypen, was sich beispielsweise in der Verbesserung von Landnutzungsklassifikationen [35],[111] ausnützen lässt. Des weiteren erlaubt die SAR Polarimetrie durch ihren vergrößerten Raum an Observablen auch einfache physikalische Modellierungen. Durch Invertierung polarimetrischer Streumodelle lassen sich z.B. Bodenparameter wie Rauigkeit und Bodenfeuchte bestimmen [30]. Weiterhin lassen sich mit Hilfe der SAR Polarimetrie auch die Anteile verschiedener charakteristischer Rückstreuklassen ermitteln [65], selbst wenn sie sich innerhalb eines Pixels gegenseitig überlagern.

In Kapitel 3 wird auf die Besonderheiten der Verarbeitung polarimetrischer SAR Daten eingegangen. Aufbauend auf die grundlegenden Konzepte der SAR Polarimetrie, zusammengefasst in Abschnitt 3.1, wird in Abschnitt 3.2 eine Zeit-Frequenz Analyse polarimetrischer Daten vorgenommen. Der hierdurch weiter vergrößerter Raum an Observablen erlaubt die Detektion störender anisotroper Rückstreumechanismen sowie die Entfernung ihres Einflusses aus den Daten. Des weiteren wird in Abschnitt 3.1.2 ein verbessertes polarimetrisches Klassifikationsverfahren unter Verwendung von Nachbarschaftsinformation als zusätzlicher Datendimension abgeleitet.

Interferometrisches SAR: SAR Interferometrie (InSAR) ist eine multimodale Erweiterung in der SAR Fernerkundung, welche den Beobachtungsraum geometrisch durch mehrere Aufnahmen von leicht verschiedenen Orten erweitert. Anschaulich wird in der SAR Interferometrie eine leichte Variation des Einfallswinkels vorgenommen, wobei davon ausgegangen wird, dass sich die Rückstreuungseigenschaften dabei nicht signifikant verändern. Analysiert wird dann der aufgetretene Phasenunterschied zwischen zwei oder mehreren solcher Aufnahmen, der einen direkten Zusammenhang zu der Topographie des Bodens aufweist und sich daher zur Erstellung von genauen Höhenmodellen eignet. Die ersten Experimente in diese Richtung wurden 1974 von L.C. Graham durchgeführt [79] und in den 1980ern experimentell in Form von InSAR Modifikationen am AIRSAR Sensor fortgeführt [220]. Populär wurde die SAR Interferometrie aber erst mit dem Start der ERS Satelliten, die erstmals operationelle satellitengestützte SAR Interferometrie bieten konnten. Im Jahr 2000 kumulierte diese Entwicklung in der *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), während der ein hochgenaues Höhenmodell der gesamten Landoberfläche der Erde zwischen 60°N und 60°S erzeugt wurde [213]. Die SAR Interferometrie ist heutzutage eine etablierte Technik, welche mit einer Vielzahl von satellitengestützten Sensoren möglich ist [68][72][128].

Neben der Abbildung der Terraintopographie kann die SAR Interferometrie auch zur Bestimmung kleinster Topographieänderungen eingesetzt werden. Mit dieser sogenannten *differentiellen SAR Interferometrie* (DInSAR) lassen sich durch Phasenmessung Genauigkeiten unterhalb der Wellenlänge, also typischerweise bis in den Millimeterbereich hinein, erzielen. Dies ist in verschiedensten Anwendungsbereichen einsetzbar, wie z.B. in der Analyse tektonischer Prozesse, oder in der Beobachtung von Absenkungsprozessen als Folge menschlicher Bergbauaktivitäten [124],[48],[105]. Des weiteren lässt sich der erweiterte Beobachtungsraum der SAR Interferometrie auch mit dem der SAR Polarimetrie verschneiden [142]. In der sogenannten *polarimetrischen SAR Interferometrie* (PolInSAR) wird dies ausgenutzt, um physikalische Rückstreumodelle mehrerer sich überlagernder Streumechanismen aufzustellen. Eine Modellinvertierung erlaubt dann die Bestimmung von Schichtdicken und anderer Parameter des Objekts, was sich z.B. zur Bestimmung von Waldhöhen und Bodentopographie ausnutzen lässt [31].

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Verarbeitung interferometrischer SAR Daten. In Abschnitt 4.1 werden wiederum zuerst die grundlegenden Konzepte von SAR Interferometrie und differentieller SAR Interferometrie vorgestellt. In der Folge wird auf die Besonderheiten von flugzeuggestützter Repeat-Pass SAR Interferometrie eingegangen, eine wichtige Variante der Interferometrie, die aber bislang aufgrund verschiedener Fehlereinflüsse (siehe Abschnitt 4.2) nur sehr eingeschränkt möglich ist. In 4.3 werden mehrere Techniken zur Umgehung dieser Probleme eingeführt, wobei wiederum Zeit-Frequenz Analysen benutzt werden, um entweder erweiterte Beobachtungsmöglichkeiten zu erhalten oder genauere Korrekturen anbringen zu können.

Along-Track Interferometrie / MTI: Die im vorherigen Abschnitt beschriebene SAR Interferometrie wird präzise auch als *across-track* Interferometrie bezeichnet. Des weiteren existiert auch noch eine zweite Variante, die sogenannte *along-track* Interferometrie (ATI). Bei ihr werden zwei oder mehr, in Flugrichtung versetzte, Antennenelemente simultan betrieben. Bewegt sich ein Objekt während der Aufnahme in Blickrichtung des Sensors, so kommt es durch die geringfügig verschiedenen Empfangszeitpunkte zu einer Phasenverschiebung zwischen den beiden Aufnahmen, was sich ausnutzen lässt, um die Geschwindigkeit des Objekts zu bestimmen. Frühe Experimente in Richtung along-track Interferometrie fanden z.B. bereits in den 1980er Jahren mit einem modifizierten AIRSAR Sensor statt [74]; in der Folge wurde ATI verbreitet zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten von Wasseroberflächen eingesetzt. Über die Jah-

re entstanden mehrere Variationen dieses Konzepts, welche vor allem das Ziel hatten, durch Einführung weiterer Empfängerkanäle die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung zu verbessern [22][98]. Mit den geplanten TerraSAR-X und RADARSAT-2 Sensoren wird auch erstmals operationelle Along-Track Interferometrie mit einem zivilen satellitengestützten Sensor möglich sein [179][137].

Eine weitere Möglichkeit von Sensoren mit mehreren simultanen betriebenen Antennenelementen in Azimut ist die Detektion von Position und Geschwindigkeit von Bewegtzielen am Boden (*moving target detection*, MTI) [184]. Die Anwendungsgebiete lagen bislang vor allem im militärischen Bereich [46], in neuerer Zeit wird aber auch der Einsatz von MTI für die zivile Verkehrsbeobachtung vorgeschlagen [126][87]. Sind mehr als 2 Empfängerkanäle verfügbar, wird zur Unterdrückung der Rückstreuung nicht-bewegter Ziele bei MTI Anwendungen gerne auf sogenanntes space-time adaptive processing (STAP) zurückgegriffen [101]. Diese Arbeit beschäftigt sich nicht weiter mit der Verarbeitung von Daten, die simultan von einem Antennenarray in Azimut aufgezeichnet wurden, die also simultan unter mehreren Squintwinkeln empfangen wurden.

Zeit-Frequenz Analysen: Existiert nur ein Empfängerkanal, so lässt sich trotzdem eine gewisse Adaption auf den Squintwinkel über sogenannte *Zeit-Frequenz Analysen* erreichen. Dabei wird das DOPPLER-Spektrum in Azimut in mehrere Subbänder aufgespalten, die jeweils eine leicht unterschiedliche mittlere Blickrichtung auf die Szene repräsentieren. Man erhält damit gleichzeitig eine gewisse Auflösung in Azimut (d.h. Zeit) als auch im Squintwinkel (d.h. DOPPLER-Frequenz). Gleiches ist auch in Entfernungsrichtung möglich, wobei hier die verschiedenen Subbänder verschiedenen Wellenlängen entsprechen. Zeit-Frequenz Zerlegungen besitzen eine lange Geschichte in der SAR Fernerkundung und wurden vor allem zur optimierten Prozessierung von SAR Daten [129][190] und zur Analyse bzw. zur Fokussierung von bewegten Objekten verwendet [26].

In neuerer Zeit wurden außerdem Zeit-Frequenzanalysen direkt in der SAR Bildanalyse eingesetzt. So lässt sich beispielsweise das Korrelationsverhalten zwischen Subaperturen ausnutzen, um kohärente Punktstreuer in der Szene zu detektieren [191][185]. Polarimetrische Signaturen weisen in vielen Fällen eine starke Abhängigkeit vom Blickwinkel auf, was ein Problem für hochauflösende SAR Systeme darstellt und durch polarimetrische Zeit-Frequenz Analysen gelöst werden kann [1][58]. Noch einen Schritt weiter geht die Kombination von Polarimetrie, Interferometrie und Zeit-Frequenzanalyse auf Basis von Waveletzerlegungen mit dem Ziel der optimalen Erzeugung von Höhenmodellen [37].

In dieser Arbeit wird an mehreren Stellen auf die Zeit-Frequenzanalyse von SAR Daten eingegangen. Kapitel 2.2.2 gibt eine Einführung in der Bildung von Subaperturen mit Hilfe FOURIER-Transformationen. In Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3 wird eine Zeit-Frequenz Analyse teilprozessierter Daten verwendet, um Fehler der Bewegungskompensation in adaptiver Weise auszugleichen. In ähnlicher Weise wird in Kapitel 4.3.1 eine Zeit-Frequenz Analyse benutzt, um eine Adaption der Bewegungskompensation auf die Topographie der Szene zu erreichen. Kapitel 3.2 beschäftigt sich mit der Zeit-Frequenzanalyse polarimetrischer SAR Daten zur Eliminierung anisotroper Rückstreuung. Schließlich wird in Kapitel 4.3.2 eine Zeit-Frequenz Analyse interferometrischer Daten vorgenommen, um kleinste Fehler in der Bestimmung der Basislinie aus den Daten selbst abzuleiten.

Weitere Techniken: Die obige Aufstellung mehrkanaliger Erweiterungen des SAR Prinzips ist bei weitem nicht vollständig und gibt nur einen Überblick über die wichtigsten Bereiche. Eine wichtige noch zu erwähnende Technik ist die Bildung von Zeitreihen, d.h. die regelmäßige Beobachtung eines Gebiets mit anschließender kombinierter Auswertung der Datensätze. Dies lässt

sich natürlich in vielerlei Hinsicht direkt zur Beobachtung von zeitlich veränderlichen Prozessen einsetzen. Aber auch im Sinne der differentiellen SAR Interferometrie werden solche Zeitreihen z.B. zur Filterung von atmosphärischen und topographischen Fehlern verwendet, was es erlaubt, minimalste Bodendeformationen sehr zuverlässig zu detektieren [47][48]. Eine andere Möglichkeit, einen solchen Datensatz mit vielen interferometrischen Basislinien kombiniert auszuwerten, stellt die sogenannte *SAR Tomographie* dar. Bei ihr wird eine zusätzliche synthetische Apertur senkrecht zu Azimut- und Entfernungsrichtung aufgebaut, um eine echte dreidimensionale Abbildung der Szene zu erreichen [168]. Diese Technik lässt sich wiederum auch mit der SAR Polarimetrie kombinieren [81].

Schwerpunkt dieser Arbeit wird die Verarbeitung multimodaler hochauflösender SAR Daten bilden. Zu diesem Zweck wird ein Exkurs durch die drei aktuell wohl bedeutsamsten Themenkomplexe der SAR Fernerkundung unternommen - der SAR Prozessierung (Kapitel 2), der SAR Polarimetrie (Kapitel 3) und der SAR Interferometrie (Kapitel 4). Zusätzlich zu einer detaillierten Einführung in das jeweilige Gebiet soll in allen Bereichen aufgezeigt werden, wie sich durch Hinzunahme multimodaler Verarbeitungstechniken, bzw. mit Hilfe der mehrkanaligen Information selbst, signifikante Verbesserungen in der Auswertung erzielen lassen.

2 SAR Prozessierung

2.1 Grundlagen

2.1.1 Das Auflösungsvermögen eines SAR Sensors

Das Ziel der Radarfernerkundung ist es, eine zweidimensionale Reflektionskarte des Bodens im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums anzufertigen. Radarsysteme basieren auf der Messung von Laufzeiten (RADAR = **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) [141]. Ein normales, monostatisches, bildgebendes Fernerkundungsradar besteht aus einem Mikrowellensender und -empfänger, welche auf einer beweglichen Plattform, wie einem Flugzeug oder Satellit, betrieben werden. Im einfachsten Fall wird die Antenne senkrecht zur Flugrichtung und schräg nach unten ausgerichtet (siehe Abb. 2.1). Die Blickrichtung des Sensors wird dabei üblicherweise mit *Entfernung* oder engl. *slant range* bezeichnet, die Flugrichtung mit *Azimut*. Der Sender schickt schnell hintereinander mit der sog. *Pulswiederholfrequenz* (PRF) kurze Mikrowellenpulse aus, welche vom Boden zurückgestreut werden, nach einer gewissen Verzögerung Δt wieder am Empfänger eintreffen und dort registriert werden. Die Laufzeit

$$\Delta t = \frac{2r}{c} \quad (2.1)$$

ist eine Funktion des Abstands r zwischen Sensor und Streuer, wobei c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Verschiedene Objekte am Boden können unterschieden werden, da ihre Echos verschiedene Laufzeiten aufweisen. Die erzielbare Auflösung in Entfernung δ_{sr} hängt nur von der verwendeten Pulsdauer τ , bzw. von der entsprechenden Bandbreite W des Pulses ab:

$$\delta_{sr} = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2W} \quad (2.2)$$

Ganz offensichtlich ist die Auflösung in Entfernung nicht von der Entfernung des Objekts, der sogenannten Zielentfernung, abhängig. Um hohe Auflösungen zu erzielen, sind extrem kurze Pulse notwendig, was allerdings in der Praxis zu technischen Problemen mit den dabei auftretenden hohen Energiedichten an der Antenne führt. Aus diesem Grund wird in modernen Radarsystemen stattdessen eine hohe Bandbreite durch einen langen Puls mit linearer Frequenzmodulation (häufig als *Chirp* bezeichnet) erzielt. Die Energie eines solchen Pulses ist über eine längere Zeit verteilt, kann aber durch ein Pulscompressionsverfahren im Empfänger wieder komprimiert werden [100]. Im folgendem wird, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, von bereits entfernungskomprimierten, bzw. von mit einem kurzen Puls erzeugten Daten ausgegangen.

In Flug- bzw. Azimutrichtung entspricht die Auflösung eines einfachen *side-looking radar* (SLAR) der Ausdehnung der Antennenkeule am Boden. Die Winkelauflösung α_{ra} einer realen Apertur

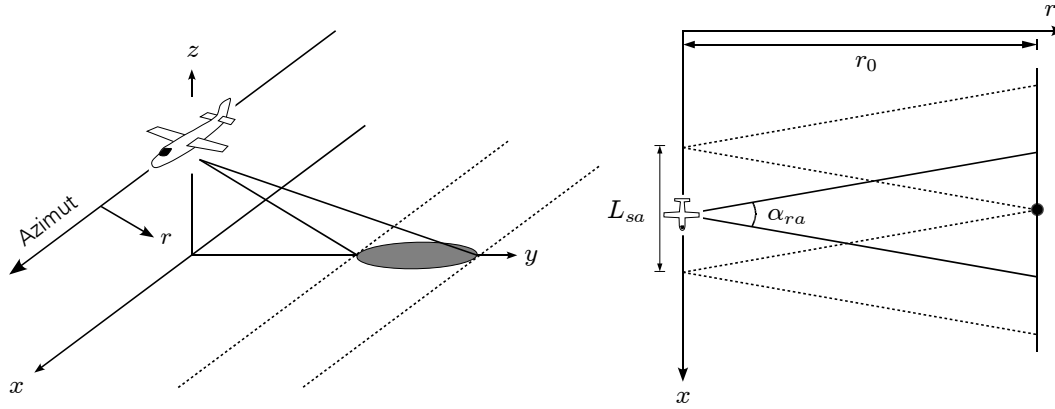


Abbildung 2.1: Links: SLAR/SAR Abbildungsgeometrie im *Strip-map* Modus. Rechts: Geometrische Darstellung der maximal möglichen Länge der synthetischen Apertur L_{sa}

der Länge L wird vor allem durch Beugungseffekte an ihrer Öffnung beschränkt. Gemäß dem RAYLEIGH-Kriterium [146] beträgt sie bei einer Wellenlänge λ näherungsweise

$$\alpha_{ra} \simeq \frac{\lambda}{L} \quad . \quad (2.3)$$

Die räumliche Auflösung in Azimut in einer gegebenen Entfernung r_0 beträgt somit

$$\delta_{az} \simeq \alpha_{ra} r_0 = \frac{\lambda r_0}{L} \quad . \quad (2.4)$$

Ganz offensichtlich nimmt die Azimutauflösung mit steigender Entfernung bzw. Flughöhe ab. Hohe Azimutauflösungen erfordern daher generell große Antennen und kurze Zielentfernungen, was den Einsatz eines SLARs auf Satelliten nicht sinnvoll erscheinen lässt. Beispielsweise würde sich im L-Band, bei einem 800 km hohen Orbit und einer Antennenapertur von 15 m, nur eine Azimutauflösung von ca. 3 km ergeben.

Das modernere *Synthetic Aperture Radar* (SAR) löst dieses Problem: Es erzielt auch über hohe Entfernungen und mit relativ kleinen Antennen eine hohe Azimutauflösung [40]. Ein SAR System nutzt den Effekt aus, dass das Echo eines Streuers am Boden in mehr als nur einem Empfangsecho enthalten ist und sich eine charakteristische Phasenhistorie während der Beleuchtungszeit ausbildet. Eine geeignete kohärente Verarbeitung mehrerer Pulse führt zu der Bildung einer sogenannten *synthetischen Apertur*, also einer künstlichen Verlängerung der eigentlichen Antennenstruktur. Die Bildung der synthetischen Apertur ähnelt sehr stark der Handhabung eines Antennenarrays, nur mit dem Unterschied, dass die einzelnen Antennenpositionen nacheinander durch die Vorwärtsbewegung des Sensors eingenommen werden.

Die Winkelauflösung einer synthetischen Apertur der Länge L_{sa} wird wiederum durch das Beugungslimit bestimmt, ist allerdings zweimal größer als im Fall einer realen Apertur der gleichen Länge:

$$\alpha_{sa} = \frac{\lambda}{2L_{sa}} \quad . \quad (2.5)$$

Der Faktor zwei ist ein Ergebnis der Bildung der synthetischen Apertur: Die Phasendifferenzen zwischen den einzelnen Elementen der synthetischen Apertur entstehen durch den Zweiwegelaufzeitunterschied zum Streuer und sind daher zweimal so groß wie im Fall einer realen Antenne, wo nur der Einweglaufzeitunterschied auftritt.

Die maximale mögliche Länge der synthetischen Apertur entspricht genau der Länge der Flugbahn, auf der ein Streuer beleuchtet und damit beobachtet wird. Wie aus Abb. 2.1 hervorgeht, entspricht diese Länge genau der Länge der Antennenkeule am Boden in der Entfernung r_0 , in der der Streuer sich befindet:

$$L_{sa} \simeq \alpha_{ra} r_0 = \frac{\lambda r_0}{L} \quad . \quad (2.6)$$

Wenn die volle synthetische Apertur genutzt wird, entsteht in der Entfernung r_0 somit eine räumliche Auflösung in Azimutrichtung von

$$\delta_{az} = \alpha_{sa} r_0 = \frac{L}{2} \quad . \quad (2.7)$$

Interessanterweise ist die erzielte Auflösung gemäß Gl. 2.7 völlig unabhängig von Zielentfernung und Wellenlänge und nur von der Größe der realen Antenne bestimmt. Dies ist ein Ergebnis der sich mit steigender Entfernung verlängernden synthetischen Apertur, welche den theoretisch einhergehenden Auflösungsverlust genau kompensiert. Aufgrund der dann breiten Antennencharakteristik erzielt ein SAR, im Gegensatz zu einem SLAR, auch mit einer kürzeren realen Antenne eine bessere Auflösung. Bei großen Flughöhen besteht aber dennoch das Problem der geringen Rückstreuintensität, was eine genügend hohe Antennenverstärkung und damit eine gewisse Antennengröße notwendig macht. Aufgrund technischer Einschränkungen (elektrische Leistung, Datenrate, etc.) haben satellitengestützte Systeme daher trotzdem typischerweise eine etwas niedrigere Auflösung (bis zu ca. 1m) als flugzeuggestützte Systeme (bis ca. 10cm). Generell lässt sich aber sagen, dass erst mit dem SAR Prinzip eine hochauflösende Abbildung im Mikrowellenbereich über großen Entfernungen hinweg möglich wurde [40].

2.1.2 Das SAR Signal

Die SAR Bildgenerierung aus den vom Sensor aufgenommenen Rohdaten, üblicherweise als *SAR Prozessierung* bezeichnet, entspricht der Bildung der synthetischen Apertur. Während der Datenaufzeichnung wird ein beleuchtetes Objekt durch eine spezielle Transferfunktion auf die gemessenen Rohdaten abgebildet; die Aufgabe der SAR Prozessierung ist es nun, diesen Prozess rückgängig zu machen um somit die bestmögliche Wiedergabe der Szene aus den Rohdaten zu erzielen. Da der Informationsgehalt der Rohdaten prinzipiell begrenzt ist, kann mit einer solchen Inversion der Daten natürlich auch nur eine näherungsweise Darstellung der Reflektivität der Szene erzielt werden.

Bevor eine detaillierte Beschreibung von Prozessierungsmethoden gegeben werden kann, ist zuerst eine präzise Darstellung der Eigenschaften des SAR Signals nötig. Aus Gründen der Einfachheit wird daher vorerst ein idealer Sensor angenommen, der sich mit konstanter Geschwindigkeit v auf einer gradlinigen Flugbahn in Azimutrichtung, mit den Koordinaten $x = v \cdot t_{az}$ und $r = 0$ bewegt, wobei t_{az} den Azimutzeitpunkt während der Datenaufzeichnung bezeichnet. Außerdem wird, wie bereits erwähnt, eine mögliche Frequenzmodulation während des Pulses ignoriert, da

diese nur der Umgehung technischer Schwierigkeiten dient und nur einen geringen Einfluss auf die Gegebenheiten der SAR Bildfokussierung hat [100].

Zur Beschreibung des Prozesses der Rückstreuung des Sendepulses am Boden wird eine sogenannte Reflektivitätsfunktion $\varrho(x, r)$ herangezogen, welche ein Pixel als kohärente Überlagerung einzelner δ -förmiger Punktstreuer modelliert

$$\varrho(x, r) = \sum_n \rho_n \delta(x - x_n, r - r_n) \quad (2.8)$$

wobei ρ_n die komplexe Rückstreuamplitude des n -ten Streuers an der Positionen (x_n, r_n) und $\delta(x, r)$ die zweidimensionale DIRAC'sche Deltafunktion bezeichnet. Der Sender emittiert wie erwähnt mit einer gewissen *Pulswiederholfrequenz* (PRF) kurze Pulse in Richtung des Bodens und empfängt deren zurückgestreute Echos nach einer kurzen Zeitverzögerung. Die gesendeten Pulse des Sensors an der Azimutposition x lassen sich als

$$s_t(x, t) = P(t) \exp(i\omega_0 t) := \delta(t) \exp(i\omega_0 t) \quad , \quad (2.9)$$

darstellen, wobei $P(t)$ die Einhüllende des Pulse, in dieser Darstellung als Deltafunktion angenommen, und ω_0 die Träger-Kreisfrequenz des Radars ausdrückt. An jeder Azimutposition x bezeichnet die Zeit $t = 0$ den Moment, an dem der Radarpuls ausgesendet wurde. Aufgrund des großen Unterschieds zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Mikrowellen c (Lichtgeschwindigkeit) und der Geschwindigkeit der Sensorplattform v kann der Versatz zwischen der Sende- und der Empfangsposition der Pulse vernachlässigt werden¹. Unter dieser Annahme wird nach einer Zeitverzögerung von

$$\Delta t_n(x, x_n, r_n) = \frac{2r(x - x_n, r_n)}{c} \quad (2.10)$$

das Echo eines Streuers an der Position (x_n, r_n) am Sensor empfangen, wobei $r(x - x_n, r_n)$ den Abstand zwischen dem Sensor an der Position x und dem Streuer an der Position (x_n, r_n) bezeichnet. Das Echo eines einzelnen Streuers besitzt die gleiche Einhüllende wie der gesendete Puls, ist aber aufgrund der Laufzeitverzögerung um $\omega_0 \Delta t_n$ phasenverschoben. Das gesamte empfangene Echo an der Position x ist eine kohärente Überlagerung der Echos aller Streuer, die von dieser Position aus beleuchtet wurden:

$$\begin{aligned} s_r^{tot}(x, t) &= \sum_n \rho_n \delta\left(t - \frac{2r(x - x_n, r_n)}{c}\right) \cdot \exp\left(-\frac{2i\omega_0 r(x - x_n, r_n)}{c}\right) \exp(i\omega_0 t) \\ &= \exp(i\omega_0 t) \iint \varrho(x_n, r_n) \exp\left(-\frac{2i\omega_0 r(x - x_n, r_n)}{c}\right) \delta(t - \Delta t_n) dx_n dr_n. \end{aligned} \quad (2.11)$$

In der Hardware des Empfängers wird die Trägerfrequenz durch eine *kohärente quadratische Demodulation* entfernt [88], bevor die Daten in komplexer Form digital aufgezeichnet werden. Die Demodulation eliminiert den Exponentialterm vor dem Integral in Gl. 2.11. Die Echophase, sowie die Position jedes einzelnen Streuers in den Rohdaten, hängt von dem Verlauf von Δt_n und damit $r(x - x_n, r_n)$ während der Beleuchtungszeit ab. Diese Phasenhistorie wird in

¹Für einen typischen flugzeuggetragenen Sensor liegt dieser Versatz typischerweise unter einem Zentimeter

der Literatur oft fälschlicherweise als DOPPLER-Phase bezeichnet, obwohl genaugenommen nur der Positionswechsel und nicht die Geschwindigkeit der Sensorplattform für den beobachteten Phaseneffekt nötig ist.

Da sich der Sensor an der Position $r = 0$ befindet, lässt sich der Entfernungsverlauf des n -ten Streuers folgendermassen beschreiben:

$$r(x - x_n, r_n) = \sqrt{r_n^2 + (x - x_n)^2} \simeq r_n + \frac{(x - x_n)^2}{2r_n} . \quad (2.12)$$

Unter dieser Näherung ergibt sich damit ein quadratischer Phasenverlauf in den Rohdaten. Für einen Streuer an der Azimutposition $x_n = 0$ beträgt er

$$\Phi(x, r_n) = \frac{\omega_0 x^2}{cr_n} , \quad (2.13)$$

was einer linearen Modulation in der Azimut-Wellenzahl von

$$k_x(x) = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{2\omega_0 x}{cr_n} = \frac{2\omega_0}{c} \sin \beta(x) \quad (2.14)$$

entspricht, wobei β den sogenannten *Squintwinkel* bezeichnet, unter dem ein Signal relativ zur DOPPLER-Null Richtung empfangen wird.

Die Echos eines Streuers kommen, von verschiedenen Azimutpositionen x aus betrachtet, nicht mit der gleichen Verzögerung an und erscheinen damit eventuell nicht in der selben Entfernungszeile. Stattdessen folgt ihr Empfangszeitpunkt einer hyperbolischen, um x_n zentrierten Kurve mit einer Krümmung, die von r_n abhängig ist. Dieser Effekt wird in der Literatur als Zielentfernungsänderung oder *range cell migration* (RCM) bezeichnet [18][116]. Im Falle einer im Vergleich zur Zielentfernung kurzen synthetischen Apertur ist die in Gl. 2.12 beschriebene parabolische Näherung möglich. Sie ist für mittel- und niedrigauflösende SAR Systeme im allgemeinen gültig, kann aber bei modernen, sehr hochauflösenden Sensoren nicht immer angenommen werden.

In Abb. 2.2 wird der RCM-Effekt anhand einer einfachen Konfiguration aus zwei Streuern in unterschiedlichen Azimut- und Entfernungspositionen illustriert. In den Rohdaten erscheinen die beiden Punktstreuer als zwei sich überlagernde gekrümmte Linien. Unter der parabolischen Näherung kann die gesamte Rohdatenantwort eines einzelnen Streuers als

$$s_r^n(x, x_n, r_n) = \rho_n \exp\left(\frac{2i\omega_0 r_n}{c}\right) \exp\left(\frac{i\omega_0 (x - x_n)^2}{cr_n}\right) \text{rect}\left(\frac{(x - x_n)}{L_{sa}}\right) . \quad (2.15)$$

geschrieben werden. Es ist anzumerken, dass Gl. 2.15 den Signalverlauf entlang der parabolischen Kurve und nicht entlang konstanter Laufzeitverzögerung Δt beschreibt. Der erste Exponentialterm besitzt eine konstante Phase, welche dem minimalen Abstand zwischen Sensor und Objekt entspricht. Er besitzt keinerlei Bedeutung in der normalen zweidimensionalen SAR Prozessierung, wird aber bedeutsam in weiterführenden Techniken wie der SAR Interferometrie. Der zweite Exponentialterm beinhaltet einen quadratischen Phasenterm, welcher die Variation der empfangenen Phase entlang Azimut beschreibt. Die Auswertung dieses charakteristischen Phasenterms ist die Basis der Azimutfokussierung. Schließlich beschreibt die zusätzlich eingeführte rect-Funktion

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } |x| \leq 0.5 \\ 0 & \text{falls } |x| > 0.5 \end{cases} \quad (2.16)$$

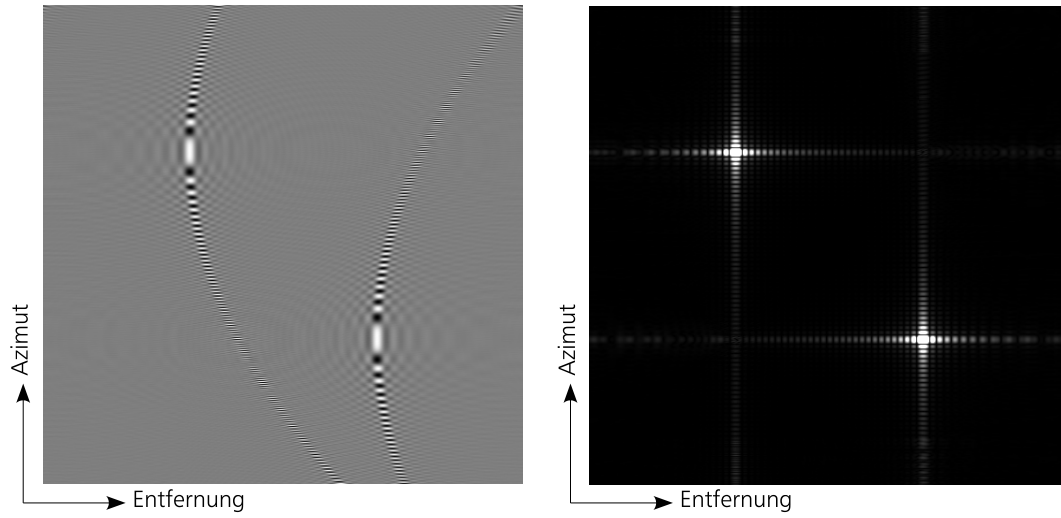


Abbildung 2.2: Links: Realteil von simulierten komplexen Rohdaten zweier punktförmiger Ziele an unterschiedlichen Azimut- und Entfernungspositionen. Rechts: Prozessiertes Bildergebnis nach RCM Korrektur und Azimutfokussierung.

die Endlichkeit der Beleuchtungsdauer aufgrund der Antennencharakteristik (Gl. 2.6), welche bereits durch die verwendete parabolische Näherung impliziert wurde.

Gl. 2.11 und 2.12 beschreiben in einer allgemeinen Weise, wie sich die beobachtete Szene in den aufgezeichneten Rohdaten manifestiert. Aufgrund des Effekts der Zielentfernungsänderung besitzt jedes Objekt eine zweidimensionale Repräsentation in den Rohdaten. Die SAR Prozessierung hat nun die Aufgabe, diesen Prozess rückgängig zu machen und ist daher generell auch für ein punktförmiges Objekt eine zweidimensionale Operation. Nur unter bestimmten Annahmen kann sie in zwei unabhängige, eindimensionale Probleme aufgespalten werden.

2.2 Prozessierungsmethoden

2.2.1 Bildfokussierung über Matched Filter

Die Aufgabe der SAR Prozessierung ist es, die Rückstreueenergie eines Objekts, welche während eines gewissen Intervalls auf der Azimuttrajektorie empfangen wurde, wieder auf die Position des Streuers, von der sie gekommen ist, zu fokussieren. In anderen Worten, es soll eine Näherung der originalen Reflektivitätsfunktion $\varrho(x, r)$ bestimmt werden. Wie bereits erwähnt sind Azimut- und Entfernungskordinaten nicht unabhängig voneinander, da jeder Streuer eine zweidimensionale Antwort in den Rohdaten hervorruft. Zusätzlich variiert deren Krümmung mit der Distanz zwischen Objekt und Sensor. Allgemein erhält man das Bildergebnis $v(x, r)$, indem man die Rohdaten Pixel für Pixel mit einer zweidimensionalen *Referenzfunktion* $h_{ref}(x, t, x_n, r_n)$ korreliert, welche je nach Position des prozessierten Punktes im Bild geeignet angepasst wird. Für ein einzelnes Pixel an der Stelle (x_n, r_n) lässt sich dies folgendermaßen ausdrücken:

$$v(x_n, r_n) = \iint s_r^{tot}(x, t) h_{ref}(x, t, x_n, r_n) dx dt \quad . \quad (2.17)$$

Gl. 2.17 stellt die allgemeinste Form der SAR Bildgenerierung dar [76]. Die Referenzfunktion $h_{ref}(x, t, x_n, r_n)$ muss so gewählt werden, dass die Multiplikation mit den Rohdaten die Phasenhistorie eines Pixels an (x_n, r_n) entlang der hyperbolischen Kurve, wie in Gl. 2.15 beschrieben, kompensiert. Die Integration addiert alle Werte auf, was immer dann zu einer großen Summe führt, wenn eine Übereinstimmung zwischen Referenzfunktion und Rohdaten besteht. Falls nicht, löschen sich die resultierenden, unkorrelierten komplexen Werte während der Integration mehr oder weniger aus. Aufgrund der von modernen hochauflösenden Sensoren aufgezeichneten hohen Datenmengen kann diese zweidimensionale Korrelation mit veränderlichen Korrelationskernen ein extrem rechenaufwendiger Prozess werden. Für den praktischen Einsatz werden daher meist spezielle optimierte Algorithmen verwendet.

Im folgenden soll eine auf mehreren Vereinfachungen basierende SAR Prozessierungsmethode beschrieben werden. Sie wird normalerweise als DOPPLER-Prozessierung bezeichnet und ist durch ihr einfaches Konzept gut geeignet, das Prinzip der SAR Bildgenerierung zu verstehen. Im Anschluss werden in Kapitel 2.2.4 fortschrittlichere Prozessierungstechniken im Überblick vorgestellt, bevor in Kapitel 2.2.5 und 2.3 ein Fokussierungsverfahren betrachtet wird, welches eine enge Beziehung zur physikalischen Wellenausbreitung besitzt und nahezu ohne Näherungen auskommt.

Ist die prozessierte synthetische Apertur kurz genug, sind die Entfernungsvariationen der Echos während der Beleuchtungszeit so klein, dass alle Echos in derselben Entfernungszeile abgebildet werden. Auf Gl. 2.12 folgt, dass dies der Fall ist, wenn

$$L_{sa} < 4\sqrt{r_0\delta_{sr}} \quad . \quad (2.18)$$

Unter dieser Bedingung werden Laufzeit und Entfernung austauschbar mittels $r = ct/2$. Die zweidimensionale Korrelation in Gl. 2.17 reduziert sich dann auf einen Satz eindimensionaler Operationen. Eine Azimutspalte des Bildergebnisses kann folgendermaßen berechnet werden

$$\begin{aligned} v(x, r_n) &= s_r^{tot}(x, t = 2r_n/c) \odot_x h_{ref}(x, r_n) \\ &= s_r^{tot}(x, t = 2r_n/c) \odot_x \exp\left(\frac{i\omega_0 x^2}{cr_n}\right) \quad , \end{aligned} \quad (2.19)$$

wobei \odot_x die mathematische Korrelation in x -Richtung bezeichnet. $h_{ref}(x, r_n)$ ist die passende Referenzfunktion für einen Punktstreuer in der Entfernung r_n . Sie kann einfach von Gl. 2.11 abgeleitet werden, indem man stattdessen eine inverse Azimutphasenhistorie für ein Signal von (x_n, r_n) verwendet. Führt man diese Korrelation für ein Punktstreuer an der Stelle (x_n, r_n) durch, so ergibt sich

$$\begin{aligned} v(x, r_n) &= s_r^n(x, x_n, r_n) \odot_x h_{ref}(x, r_n) \\ &= \int_{r_n - L_{sa}/2}^{r_n + L_{sa}/2} \rho_n \exp\left(\frac{2i\omega_0 r_n}{c}\right) \exp\left(\frac{i\omega_0(\xi - x_n)^2}{cr_n}\right) \exp\left(-\frac{i\omega_0(\xi - x)^2}{cr_n}\right) d\xi \\ &= L_{sa}\rho_n \exp\left(\frac{2i\omega_0 r_n}{c}\right) \exp\left(\frac{i\omega_0}{cr_n}(x - x_n)^2\right) \text{sinc}\left(\frac{\omega_0 L_{sa}}{cr_n}(x - x_n)\right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

wobei ‘sinc’ die *Kardinalsinusfunktion* $\sin(x)/x$ bezeichnet. Die erzielte Auflösung wird normalerweise als der halbe Abstand der ersten Minima der sinc-Funktion definiert. Es ergibt sich

daher

$$\delta_{az} = \frac{\pi c r_n}{\omega_0 L_{sa}} \quad . \quad (2.21)$$

Die erzielte Auflösung hängt also von der Länge der synthetischen Apertur und der Entfernung ab. Substituiert man Gl. 2.6 in Gl. 2.21, so zeigt sich die Korrektheit von Gl. 2.7. Außerdem zeigt Gl. 2.20, dass die komplexe Amplitude des Peaks von $v(x, r_n)$ an der Stelle x_n proportional zu der Rückstreuamplitude ρ_n des Objekts ist, verstärkt durch einen Faktor, der proportional zu der Länge der prozessierten synthetischen Apertur ist. Die Phase an der Stelle des Peaks entspricht dem geometrischen Phasenterm, der sich aus dem minimalen Abstand zwischen Sensor und Objekt ergibt. Abseits vom Peak kann des weiteren ein quadratischer Phasenverlauf beobachtet werden, der dem der Rohdaten entspricht.

Für den Grenzfall $L_{sa} \rightarrow \infty$ wird die sinc-Funktion in Gl. 2.20 ein Ausdruck für $\delta(x - x_n)$, was theoretisch einer perfekten Inversion des Datenaufzeichnungsprozesses entsprechen würde. In der Praxis kann dies nicht erreicht werden, da für lange synthetische Aperturen die parabolische Näherung ihre Gültigkeit verliert. Die maximal mögliche Auflösung bleibt prinzipiell beschränkt auf das physikalische Limit von $\lambda/4$.

Die beschriebene Zeitbereichsformulierung ist extrem rechenaufwendig und daher sehr ineffizient. Mit Hilfe des *Faltungstheorems* [144] lässt sich die Korrelation aus Gl. 2.20 auch als Multiplikation mit einer zeitinvertierten Antwortfunktion im Wellenzahlbereich ausdrücken:

$$\tilde{V}(k_x, r_n) = \tilde{S}_r^{tot}(k_x, 2r_n/c) \tilde{H}_{ref}(k_x, r_n) \quad , \quad (2.22)$$

wobei $\tilde{V}(k_x, r_n)$, $\tilde{S}_r^{tot}(k_x, 2r_n/c)$ und $\tilde{H}_{ref}(k_x, r_n)$ die FOURIER-Transformationen von $v(x, r_n)$, $s_r^{tot}(x, 2r_n/c)$ und $h_{ref}(x, t_n, r_n)$ in x -Richtung sowie k_x die Wellenzahl in Azimut ausdrücken. Die Transferfunktion $\tilde{H}_{ref}(k_x, r_n)$ kann aus $h_{ref}(x, r_n)$ über

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{ref}(k_x, r_n) &= \frac{1}{2\pi} \int h_{ref}(x, r_n) \exp(-ik_x x) dx \\ &= \frac{1}{2\pi} \int \exp\left(-\frac{i\omega_0 x^2}{cr_n}\right) \exp(-ik_x x) dx \end{aligned} \quad (2.23)$$

gewonnen werden. Eine Näherung für das Integral in Gl. 2.23 kann durch das Prinzip der stationären Phase bestimmt werden. Diese Näherung geht davon aus, dass der Integrand aufgrund einer schnell veränderlichen Phase während der Integration viele Zyklen durchläuft. Die meisten Beiträge eliminieren sich daher gegenseitig, bis auf diejenigen, bei der die Ableitung der Phase Null beträgt.

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \Phi(\bar{x}) = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[-\frac{\omega_0 \bar{x}^2}{cr_n} - k_x \bar{x} \right] = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{x} = -\frac{cr_n k_x}{2\omega_0} \quad . \quad (2.24)$$

Mit diesen stationären Punkten lässt sich das Integral nähern:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{ref}(k_x, r_n) &= \frac{1}{2\pi} h_{ref}(\bar{x}, r_n) \exp(-ik_x \bar{x}) \\ &= \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{i\omega_0}{cr_n} \left(\frac{cr_n k_x}{2\omega_0}\right)^2 + ik_x \frac{cr_n k_x}{2\omega_0}\right) \\ &= \frac{1}{2\pi} \exp\left(\frac{icr_n k_x^2}{4\omega_0}\right) \quad . \end{aligned} \quad (2.25)$$

Mit diesem Spektrum der Referenzfunktion lässt sich das Spektrum des Prozessierungsergebnisses über Gl. 2.22 bestimmen. Über eine Rücktransformation in den Zeitbereich erhält man dann das Bildergebnis. Diese Frequenzraumdarstellung ist wesentlich effizienter als die entsprechende Operation im Zeitbereich, da die gesamte Korrelation durch eine einzige Multiplikation im Frequenzbereich ersetzt werden kann. In der Praxis werden daher größtenteils SAR Prozessoren eingesetzt, die im Frequenzraum arbeiten.

Zusammenfassend sind die folgenden Schritte für eine einfach SAR Prozessierung nötig

1. Kompression in Entfernung, falls eine Chirp-Pulsform benutzt wurde
2. Eindimensionale FOURIER-Transformation in Azimut
3. Multiplikation mit dem entfernungsabhängigen Spektrum der Referenzfunktion
4. Inverse FOURIER-Transformation in Azimut

Die beschriebene Methode ist ein vereinfachter Prozessierungsansatz unter Verwendung mehrerer Näherungen, die nur im Fall sehr niedriger Bildauflösung gültig sind. Im allgemeinen Fall lässt sich das Problem der SAR Fokussierung aber nicht, wie gerade beschrieben, in Azimut und Entfernung entkoppeln. Es sind dann komplexere Algorithmen nötig, um zu hochwertigen Bildergebnissen zu gelangen. Solche Algorithmen verwenden den genauen hyperbolischen Phasenverlauf und sind auch in der Lage, den Effekt der Zielentfernungsänderung zu berücksichtigen. In Kapitel 2.2.4 werde einige solche Algorithmen übersichtsweise vorgestellt.

2.2.2 Multilooking / Bildung von Subaperturen

Ein generelles Problem von SAR Aufnahmen ist der sogenannte *Speckle*-Effekt, welcher dazu führt, dass homogene Flächen, trotz hoher Auflösung, nicht in einer gleichmäßigen Helligkeit erscheinen. Dies ist eine typische Eigenschaft kohärenter Abbildungssysteme und begründet sich in der unterschiedlichen Anordnung der Einzelstreuer innerhalb einer Auflösungszelle. Alle einzelnen in einem Pixel reflektierten Wellenzüge addieren sich kohärent auf; der Wert der resultierenden Intensität ist letztendlich ein Zufallswert, der von der jeweiligen Verteilung und Art der Streuungen innerhalb des Pixels abhängt. Die sich ergebende Bildintensität ist daher verteilt um die wahre durchschnittliche Rückstreuintensität, was sich über ein multiplikatives Rauschmodell statistisch beschreiben lässt [113][118].

Die im vorherigen Kapitel beschriebene Vorgehensweise führt zu sogenannten *single-look complex* (SLC) Bildern. SLC Bilder besitzen eine hohe räumliche Auflösung; gleichzeitig ist in ihnen aber auch der Speckle maximal ausgeprägt. Gemäß Gl. 2.21 steigt die Bildauflösung linear mit länger werdender synthetischen Apertur an. Eine alternative Prozessierungsmethode, die *Multi-Look* Prozessierung, teilt die gesamte verfügbare synthetische Apertur in mehrere Abschnitte auf und bildet aus jedem Abschnitt der Apertur ein eigenes Bildergebnis, die sogenannten *Looks* [181]. Wie in Abb. 2.3) dargestellt, entspricht dies im Frequenzbereich dem Aufspalten der gesamten DOPPLER-Bandbreite in mehrere Unterbänder. Gleiches ist auch in Entfernungsrichtung möglich, nur dass hier die Bandbreite des ausgestrahlten Pulses in mehrere Bänder aufgespalten wird. Die einzelnen Looks weisen eine geringere Bandbreite und damit eine entsprechend geringere Bildauflösung auf, sind aber statistisch voneinander unabhängig. Durch inkohärente Mittelung

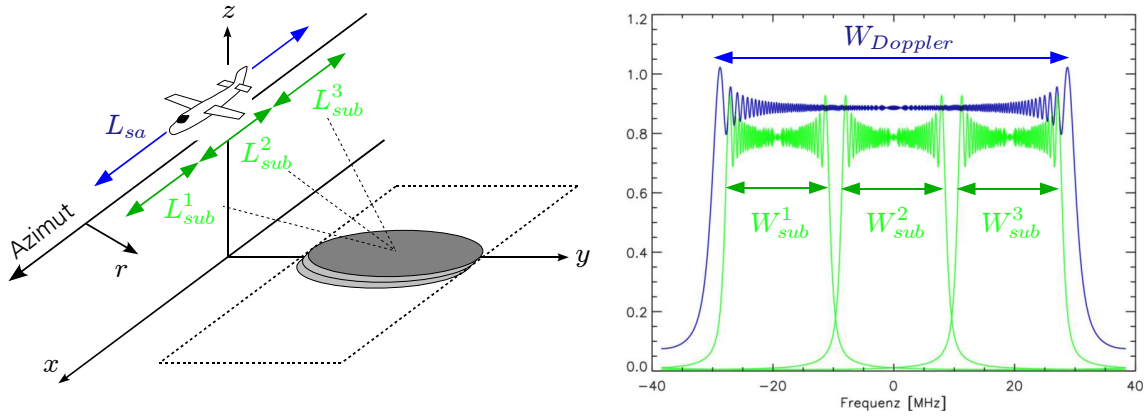


Abbildung 2.3: Multilook-Prozessierung / Bildung von Subaperturen. Links: Aufteilung der gesamten synthetischen Aperture in mehrere Subaperturen. Rechts: Darstellung der DOPPLER-Bandbreiten der Subaperturen im Frequenzraum.

ihrer Amplituden lässt sich also der störende Einfluss des Speckles reduzieren. Eine Multilook-Aufnahme weist daher eine geringere Specklekomponente auf, ist aber niedrigauflösender und nicht mehr komplexwertig.

Ein ganz ähnliches Konzept wird bei der Erzeugung von sogenannten *Subaperturen* verfolgt. Eine Subaperturaufnahme ist eine SAR Aufnahme, die nicht die volle Bandbreite in Azimut oder Entfernung aufweist, typischerweise aber noch komplexwertig ist. Sie entspricht also einem einzelnen Look aus einer Multilookprozessierung. Subaperturaufnahmen sind potentiell interessant, da sie durch die im Detail unterschiedlichen Aufnahmebedingungen auch unterschiedliche Informationen tragen.

Aus Gl. 2.14 ist bekannt, dass ein direkter Zusammenhang zwischen dem Squintwinkel β und der DOPPLER-Frequenz k_x besteht:

$$\beta(k_x) = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda k_x}{4\pi} \right) \quad (2.26)$$

Eine Subapertur in Azimut, die um eine zentrale DOPPLER-Frequenz herum gebildet wird, entspricht also einer SAR Aufnahme aus genau der zu dieser DOPPLER-Frequenz gehörenden Blickrichtung. Werden aus einer Aufnahme mehrere solche Subaperturen mit unterschiedlichen zentralen DOPPLER-Frequenzen gebildet, so ergeben sich Aufnahmen, in denen jeweils die gleiche Szene aus unterschiedlichen Richtungen betrachtet wird. Analog dazu entsprechen Subaperturen in Entfernungsrichtung Aufnahmen in geringfügig verschiedenen Wellenlängen.

Für die Erzeugung von Subaperturaufnahmen bestehen zwei Möglichkeiten. Die erste ist selbstverständlich die oben besprochenen Multilookprozessierung, wobei jede einzelne Subapertur vor der inkohärenten Mittelung gesondert gespeichert werden muss. Üblicher ist aber die Erzeugung von Subaperturaufnahmen aus dem fertig synthetisierten SAR Bild in voller Auflösung. Hierzu wird zunächst die SAR Aufnahme durch eine ein- oder zweidimensionale FOURIER-Transformation in den Frequenzbereich überführt. Dort wird dann ihr Spektrum, analog zur Frequenzraumdarstellung in Abb. 2.3, in mehrere Subbänder aufgespalten, die jeweils für sich durch eine inverse FOURIER-Transformation zurück in den Zeitbereich überführt werden. Zu beachten ist bei dieser Vorgehensweise, dass synthetisierte SAR Aufnahmen häufig eine ungleichmäßige spektrale Gewichtung aufweisen, vor allem um Nebenkeulen der Impulsantwort zu

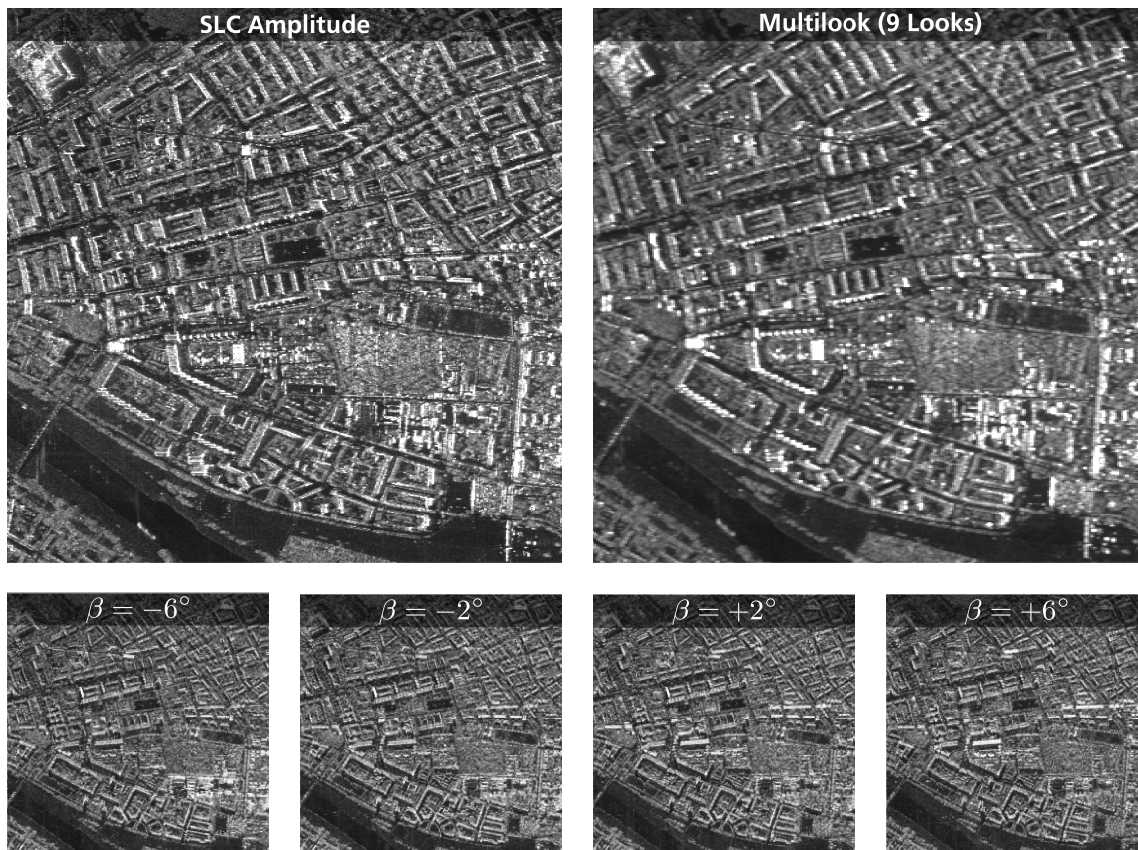


Abbildung 2.4: Multilook-Prozessierung / Bildung von Subaperturen. Oben: SLC Amplitude mit maximaler Auflösung, sowie Multilook Amplitude mit 9 Looks. Auflösung und Speckle Rauschen sind reduziert. Unten: 4 Subaperturaufnahmen mit verschiedenen Squintwinkeln. Je nach relativer Orientierung der Szene zum Sensor zeigen sich leichte Variationen in der Rückstreuung.

unterdrücken. Solche Gewichtungsfunktionen müssen vor dem Auftrennen des Spektrum entfernt werden und anschließend auf den Spektren der individuellen Subaperturen neu angebracht werden.

Abb. 2.4 zeigt am Beispiel einer urbanen Szene die Gegenüberstellung der SLC Amplitude und einer aus 9 Subaperturen erzeugten Multilook Aufnahme. Außerdem wird exemplarisch die Zerlegung in 4 Azimut-Subaperturen dargestellt. An einigen Gebäudekanten ist die Variation der Rückstreuintensität mit dem Squintwinkel deutlich zu erkennen. Dies ist ein Resultat des Auftretens von sehr starken Doppelreflektionen an Gebäudekanten, wenn diese genau senkrecht zur aktuellen LOS Richtung orientiert sind.

2.2.3 Bewegungskompensation

Bislang wurde davon ausgegangen, dass sich der Sensor auf einer idealen geradlinigen Flugbahn und mit konstanter Vorwärtsgeschwindigkeit bewegt. In der Praxis ist das nur selten der Fall; es kommt zu sogenannten *Bewegungsfehlern*, also von zeitlich variablen Abweichungen von der geradlinigen Flugbahn, oder zu Variationen in der Sensorgeschwindigkeit. Ignoriert man Bewegungsfehler während der Rohdatenprozessierung, so erhält man eine signifikant verschlechterte

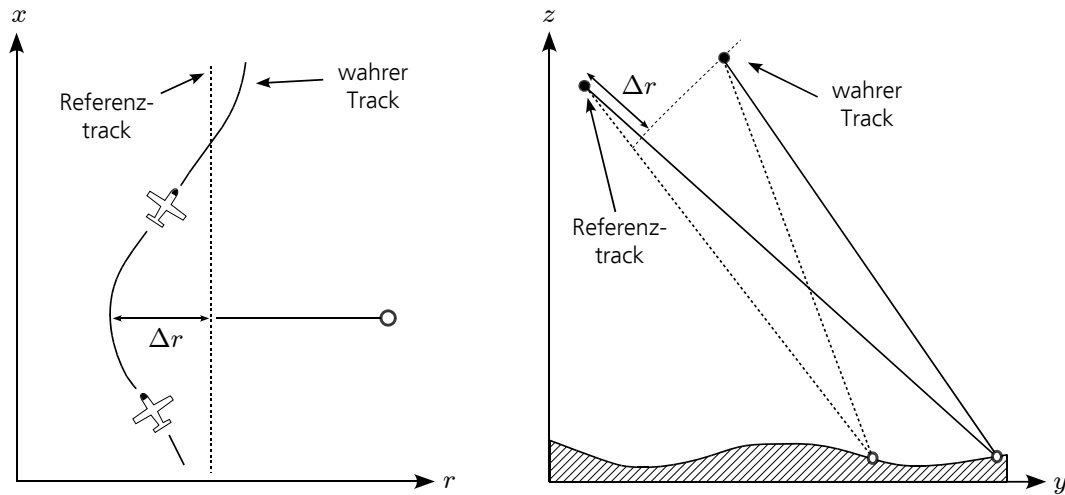


Abbildung 2.5: Links: Azimutabhängigkeit der Größe der Bewegungskompensation durch die Sensorbewegung. Rechts: Entfernungsabhängigkeit der Bewegungskompensation durch Änderung des Blickwinkels.

Bildqualität [19][132]. Zu beobachten sind insbesondere ein Verlust an Auflösung, ein Ansteigen der Nebenkeulenintensität, starke Phasenfehler sowie eine geometrische Verzerrung des Bildes. Bei der Prozessierung von Daten flugzeuggestützter Sensoren ist daher die präzise Kompensation von Bewegungsfehlern der entscheidender Punkt: Um einen SAR Sensor auf einer solchen instabilen Plattform zu betreiben und hochwertige Bildergebnisse zu erhalten, ist sowohl eine genaue Messung der Antennenposition während des Fluges nötig, als auch ein Prozessierungsalgorithmus, welcher in der Lage ist, die Abweichungen von einer linearen Bewegung zu berücksichtigen.

Während der Bewegungskompensation (MoCo) wird versucht, die Rohdaten, bzw. gewisse Zwischenergebnisse während der Prozessierung, so umzuformen, dass sie wie Daten erscheinen, die von einer idealen geradlinigen Trajektorie, dem sogenannten *Referenztrack*, aus aufgenommen worden sind. Im Anschluss daran kann eine gewöhnliche ideale SAR Prozessierung durchgeführt werden. Eine genaue Bewegungskompensation muss daher während der Azimutintegration alle Abweichungen $\Delta r(x, r)$ der realen Flugbahn vom Referenztrack in der jeweiligen Blickrichtung zum Objekt kompensieren, was einer Verschiebung der Einhüllenden des Pulses um den aufgetretenen Versatz, sowie eine entsprechende Phasenrotation beinhaltet. Bewegungsfehler stammen von der Eigenbewegung des Flugzeugs und variieren daher in Azimut. Durch die Variation des Abstrahlwinkels über die betrachtete Streifenbreite vom *Nahbereich* (near-range) zum *Fernbereich* (far-range) tritt außerdem eine signifikante Abhängigkeit des Bewegungsfehlers von der Entfernung auf (vergleiche Abb. 2.5). Streng genommen hängt der auftretende Phasenfehler zusätzlich von der jeweiligen Wellenlänge und dem Squintwinkel während der Azimutintegration ab. Diese Faktoren machen die Bewegungskompensation zu einem komplexen Arbeitsschritt, der sich exakt nur im Rahmen einer Zeitbereichsprozessierung lösen lässt.

Gewöhnlich arbeiten moderne SAR Prozessoren im Frequenzbereich und implementieren als Näherung eine zweistufige Bewegungskompensation, welche nur die Komponente des Bewegungsfehlers senkrecht zur Flugrichtung bzw. in Richtung des mittleren Squintwinkels der Aufnahme korrigiert [132][133]. In diesen Algorithmen wird der Bewegungsfehler in eine entfernungsunabhängige und eine entfernungsabhängige Komponente aufgespalten. Dies ist sinnvoll, da eine entfernungsabhängige Bewegungskompensation nur nach der Fokussierung in Entfernung und nach Korrektur der RCM erfolgen kann. Andererseits aber sollten etwaige Bewegungsfehler

möglichst früh in der Prozessierungskette eliminiert werden. Daher erfolgt eine entfernungsabhängige Bewegungskompensation 1. Ordnung gleich zu Beginn der Prozessierung. Eine entfernungskomprimierte Datenrepräsentation mit korrigierter RCM erhält man dann nach einigen weiteren Prozessierungsschritten, welche bereits die grobe Bewegungskompensation 1. Ordnung voraussetzen². An dieser Stelle wird dann die entfernungsabhängige Bewegungskompensation 2. Ordnung durchgeführt, bevor mit der Prozessierung fortgefahren wird.

Während der Bewegungskompensation werden die Daten zum einen entsprechend ihres lokalen Bewegungsfehlers entzerrt. Dies entspricht im allgemeinen einer Interpolation der Daten in Entfernungsrichtung bzw. einer einfachen Verschiebung, wenn keine Entfernungsabhängigkeit berücksichtigt werden muss. Zum anderen muss eine entsprechende Phasenrotation vorgenommen werden, damit die korrigierten Daten auch eine dem Referenztrack entsprechende Phasenlage aufweisen. Im folgenden werden nur die Phasenkorrekturen betrachtet; in der Praxis ist aber immer auch die dazugehörige Interpolation der Einhüllenden vorzunehmen.

Die Phasenfehler 1. Ordnung, der zu einer Referenzentfernung r_m in der Mitte der Szene gehört, beträgt

$$C_1(x) = \exp \left[\frac{2i\omega_0}{c} \Delta r(x, r_m) \right] , \quad (2.27)$$

wobei $\Delta r(x, r_m)$ den Laufzeitunterschied zwischen realer Flugbahn und Referenztrack für ein Ziel an der Position (x, r_m) , also in Szenenmitte, bezeichnet (vergl. Abb. 2.5). Nach dieser direkt auf den Rohdaten ausgeführten Korrektur wird die SAR Prozessierung bis zu dem Punkt, an dem die RCM korrigiert worden ist, durchlaufen. Hier kann nun die entfernungsabhängige Komponente des Bewegungsfehlers kompensiert werden. Die Phase der Bewegungskompensation 2. Ordnung beträgt:

$$C_2(x, r) = \exp \left[\frac{2i\omega_0}{c} (\Delta r(x, r) - \Delta r(x, r_m)) \right] . \quad (2.28)$$

$\Delta r(x, r_m)$ stellt hier wiederum den Laufzeitunterschied zwischen realer Flugbahn und Referenztrack für ein Ziel an der Position (x, r) dar. Bislang noch nicht betrachtet wurden Variationen in der Vorwärtsgeschwindigkeit des Sensors. Dieses Problem lässt sich im Idealfall durch eine variable PRF, die in Echtzeit an die aktuelle vom Navigationssystem des Sensors ermittelte Geschwindigkeit angepasst wird, lösen. Steht eine solche Hardwarelösung nicht zur Verfügung, so können die Rohdaten auch vor Beginn der Prozessierung in Azimut interpoliert werden, um eine räumlich gleichmäßige Abtastung in Azimut zu erreichen.

2.2.4 Moderne Algorithmen

In den letzten 20 Jahren wurde eine Vielzahl von Ansätzen zur Prozessierung von SAR Daten flugzeuggestützter Sensoren vorgeschlagen. Die genaueste Methode ist die Zeitbereichsprozessierung, welche aber einen extrem hohen Rechenaufwand von bis zu mehreren Tagen pro Bild erfordert. Für die allgemeine Offline-Prozessierung von SAR Daten wird sehr verbreitet der wesentlich

²Nur Prozessoren, welche eine solche für eine Bewegungskompensation 2. Ordnung geeignete Datenrepräsentation erzeugen können, eignen sich für die hochauflösende Prozessierung von Daten mit starken Bewegungsfehlern.

schnellere, sogenannte *Range-Doppler* Algorithmus eingesetzt [121]. Dieser Prozessierungsansatz korrigiert die RCM durch eine Interpolation im Azimut-Frequenz / Entfernung-Zeitbereich und führt im allgemeinen zu sehr guten Ergebnissen bei verhältnismäßig stabilen und hochfliegenden Sensorplattformen. Ein weiterer sehr populärer Algorithmus ist der *Chirp-Scaling* Algorithmus (CS) [162], welcher ursprünglich für eine genaue und phasentreue Prozessierung von satellitengestützten Daten entwickelt wurde. Er vermeidet Interpolationen zur Kompensation der RCM durch geeignete Skalierung der Range-Chirps. Der *Extended Chirp-Scaling* Algorithmus (ECS) [130] ist eine Weiterführung dieses Konzepts speziell für die Prozessierung von Daten flugzeuggetragener Sensoren. Er ist sowohl in der Lage, die in Abschnitt 2.2.3 beschriebene zweistufige Bewegungskompensation durchzuführen, als auch variierende DOPPLER-Zentroide in Entfernung und/oder Azimut zu berücksichtigen. Zusätzlich kann ohne jegliche Interpolation eine geometrische Skalierung der Daten sowohl in Entfernung als auch in Azimut vorgenommen werden. Inzwischen stoßen modernste flugzeuggetragene Systeme jedoch in den Auflösungsbereich um einen Dezimeter vor (und sogar darunter [46]). Hier sind die im CS / ECS Algorithmus verwendeten Näherungen nicht mehr gültig [148]. Ähnliches gilt für Systeme, die im VHF Bereich arbeiten und daher sehr lange Aperturen für eine hochauflösende Bildsynthese benötigen, sowie im Fall von sehr hohen Squintwinkeln oder extrem breitbandigen Pulsformen. Eine mögliche Lösung ist dann der sogenannte *Fast Factorized Back-Projection* Algorithmus [204], welcher für die hochauflösende Prozessierung von VHF SAR Daten vorgeschlagen wurde. Diese Methode ist eine, mittels einiger Näherungen, stark beschleunigte Variante eines Zeitbereichprozessors. Er ist aber immer noch vergleichsweise rechenaufwendig und relativ kompliziert zu implementieren.

Einen anderen Weg gehen die sogenannten Wellenzahl-Prozessoren. Wellenzahl-Prozessoren werden allgemein als die ideale Lösung des Fokussierungsproblems im Fall einer geradlinigen Sensortrajektorie angesehen, da sie praktisch keine Näherungen erfordern. Die einzige Annahme in der Wellenzahlprozessierung ist die Notwendigkeit, die auftretende HANKEL Funktion in eine FOURIER-Transformation überzuführen. Dafür ist eine asymptotische Entwicklung der HANKEL-Funktion notwendig [127]. Diese Näherung entspricht der Annahme eines hohen Zeit-Bandbreite-Produkts in Azimut³. Der erste im Wellenzahlbereich arbeitende Prozessor war der sogenannte FOURIER-HANKEL Algorithmus [86]. Weitere Entwicklungen, häufig auch als ω - k -Prozessoren bezeichnet, finden sich in [177][151][21][20][64][7][63]. Die meisten Wellenzahlprozessoren benutzen einen Interpolationsschritt im Wellenzahlbereich, das sogenannte STOLT-Mapping [194], um das Spektrum der Daten von Polarkoordinaten in kartesische Koordinaten überzuführen. Wellenzahlprozessoren sind in der Lage, Daten unabhängig von ihren Bandbreiten in Azimut und Entfernung zur maximal möglichen Auflösung zu fokussieren, allerdings ohne die Möglichkeit einer hochgenauen entfernungsabhängigen Bewegungskompensation wie im ECS Algorithmus [147][150]. Daher werden Wellenzahlprozessoren vor allem für Daten satellitengestützter Sensoren eingesetzt.

Verglichen mit der zweistufigen Bewegungskompensation des ECS Algorithmus kann im normalen unmodifizierten Wellenzahlprozessor nur die Bewegungskompensation 1. Ordnung direkt durchgeführt werden [20][78]. Wie bereits dargestellt, ist dies die entfernungsunabhängige Komponente des tatsächlichen Bewegungsfehlers, welche direkt vor oder nach der Entfernungskompression kompensiert werden kann. Im Fall von hochauflösenden Systemen ist hingegen auch eine genaue Kompensation der entfernungsabhängigen Komponente essentiell. Wie in Abschnitt 2.2.5 noch genauer erläutert, ist dieser Prozessierungsschritt in einem normalen Wellenzahlprozessor nicht möglich. In der Literatur finden sich mehrere Ansätze dieses Problem zu lösen.

³siehe [100] und [39] für eine Darstellung der Chirp-Charakteristika als Funktion des Zeit-Bandbreite-Produkts

Die in [106] und [61] beschriebene Methode basiert auf einer TAYLOR-Näherung der Phase im zweidimensionalen Spektralbereich und benutzt eine Chirp-Z Transformation,⁴ um eine Skalierung des Spektrums der Daten in Entfernung vorzunehmen. In [78] wurde durch Subapertur-Prozessierung die Bewegungskompensation 1. Ordnung auf die gesamte Strahlbreite in Azimut adaptiv gemacht. [120] stellt ein Konzept vor, welches ebenfalls durch Subapertur-Prozessierung die Squintwinkelabhängigkeit der Bewegungskompensation im Rahmen eines Wellenzahlprozessors berücksichtigt. Schließlich findet sich in [24] ein umfangreicher Überblick über die bei der Wellenzahl-Prozessierung von Spotlight-SAR Daten mit Bewegungsfehlern auftretenden Probleme, allerdings hier, anders als beim Stripmap-SAR, mit einer für die Szenenmitte optimierten Bewegungskompensation.

Im folgenden Abschnitt 2.2.5 wird eine kurze Einführung in das Konzept der Wellenzahlprozessierung gegeben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 2.3 ein neuartiger erweiterter Wellenzahlprozessor abgeleitet, welcher in der Lage ist, eine vollwertige zweistufige Bewegungskompensation, inklusive Berücksichtigung der Squintwinkelabhängigkeit des Bewegungsfehlers, vorzunehmen.

2.2.5 Wellenzahlprozessierung

Das „Radiating Reflector“ Modell

In diesem Abschnitt wird eine alternative und eher physikalisch motivierte Darstellung des Prozesses der Rohaufzeichnung eines SAR Sensors gegeben. Bislang wurde dabei eine Situation beschrieben, in welcher die Antenne einen elektromagnetischen Puls abstrahlt, dieser von den Streuern am Boden reflektiert und dann wiederum von der Antenne aufgefangen wird. Alternativ kann das reflektierte Wellenfeld auch modellhaft als nur von den Streuern herrührend angenommen werden. Die Streuer fungieren dann alle als individuelle Emitter oder Elementarantennen, welche in Richtung der Antenne abstrahlen. Diese Darstellung wird im sogenannten „radiating reflector“ Modell verfolgt, welches ursprünglich in der Geophysik im Rahmen seismischer Analysen entwickelt wurde [194],[70]. Dieses Modell bietet eine andere Sichtweise auf den Prozess der Datenaufnahme eines SAR Sensors und ist die Grundlage von Wellenzahlprozessoren, d.h. Prozessoren, welche auf den funktionalen Zusammenhängen zwischen Frequenzen und Wellenzahlen in Azimut und Entfernung beruhen.

Im Rahmen des „radiating reflector“ Modells geht man davon aus, dass alle in der Szene vorhandenen Streuer zum Zeitpunkt $t = -t_0$ simultan beginnen eine Kugelwelle abzustrahlen. Da die Laufzeiten dieser Pulse von dem jeweiligen Abstand zwischen Sensor und Streuer abhängen, erreichen die Wellenfelder, die von verschiedenen Ursprungspositionen ausgehen, auch mit verschiedenen Verzögerungen Δt die Antenne. Nimmt man nun eine Ausbreitungsgeschwindigkeit an, die exakt halb so groß ist wie die tatsächliche, so lässt sich zeigen, dass das sich ergebende Wellenfeld an der Sensorposition eine sehr gute Reproduktion des Feldes ist, welches ein Sensor erzeugen würde, der selber die Pulse aussendet und dann die reflektierten Signale empfängt [194]. Dies gilt für die Annahme, dass sich die Sensorposition zwischen Aussenden und Empfangen der Pulse nicht nennenswert verändert; aufgrund der hohen Pulswiederholfrequenz moderner Sensorsysteme ist diese Bedingung aber immer hinreichend gut erfüllt.

Das gesamte Wellenfeld $\psi_{tot}(x, t, r = 0)$, so wie es von einer Antenne zur Zeit t an der Azimutposition x und der Schrägentfernung $r = 0$ gemessen wird, ist durch die kohärente Superposition

⁴eine Art skalierte FOURIER-Transformation

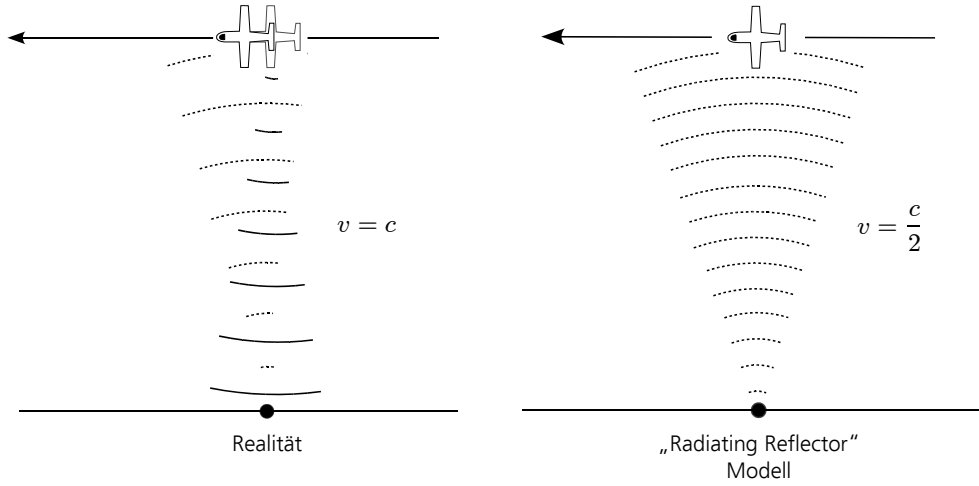


Abbildung 2.6: Datenaufzeichnung. Links: Realer Prozess über Senden und Empfangen von Pulsen. Rechts: „radiating reflector“-Prozess über simultanes Aussenden eines Wellenfeldes durch die Streuer

aller Kugelwellen, die zum Zeitpunkt $t = -t_0$ abgestrahlt wurden, gegeben:

$$\begin{aligned} \psi_{tot}(x, t, r = 0) &= \sum_n \psi_n(x, t, r = 0) \\ &= \iint \varrho(x_n, r_n) \exp\left(-\frac{2i\omega}{c} \sqrt{(x - x_n)^2 + r_n^2}\right) \delta(t - \Delta t) dx_n dr_n, \end{aligned} \quad (2.29)$$

wobei $\varrho(x_n, r_n)$ die komplexe Rückstreuamplitude des n -ten Streuers an der Position (x_n, r_n) , ω die Trägerfrequenz des Radars, c die Lichtgeschwindigkeit und $\delta(\dots)$ die DIRAC'sche Deltafunktion bezeichnet. Aus Gründen der Einfachheit und ohne Verlust der Allgemeingültigkeit wurden in Gl. 2.29 Ausbreitungsverluste und Einflüsse des Antennendiagramms vernachlässigt.

Vor dem Hintergrund eines SAR Sensors entspricht die komplexe Funktion $\psi_{tot}(x, t, r = 0)$ den aufgezeichneten Rohdaten und zwar nach der Kompression in Entfernung, sofern mit einer Chirp-Pulsform gearbeitet wurde. Unter Verwendung des „radiating reflector“ Modells kann man den Prozess der Rohdatenaufzeichnung als eine Abtastung des von den Streuern abgestrahlten Wellenfelds auf einer Reihe von Punkten entlang der Flugbahn des Sensors ansehen.

Rückprojektion des Wellenfeldes

Die Aufgabe der SAR Prozessierung ist es nun, das inverse Problem zu lösen, d.h. aus dem entlang der Sensorflugbahn $(x, r = 0)$ zum Zeitpunkt t gemessenen Wellenfeld das ursprüngliche Wellenfeld zum Zeitpunkt $t = -t_0$ zu rekonstruieren, welches der Verteilung der Streuer und damit dem gesuchten Bild entspricht. Dieser Ansatz zur SAR Prozessierung basiert auf Wellengleichungen und wird in der Literatur oft auch als 'ω-k'-Prozessierung bezeichnet [177],[21],[20]. Wie bereits erwähnt, liegen seine Vorteile in der hohen Genauigkeit, da keinerlei Näherungen verwendet werden müssen, sowie in der direkten geometrische Interpretation des Fokussierungsvorgangs.

Das gemessene Feld am Ort $r = 0$, dargestellt durch die Rohdaten, lässt sich einfach als eine Überlagerung von ebenen Wellen mit verschiedenen Wellenlängen und azimuthalen Wellenzahlen

darstellen:

$$\psi_{tot}(x, t, r = 0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \tilde{\Psi}_{tot}(k_x, \omega, r = 0) \exp(i(\omega t + k_x x)) d\omega dk_x \quad , \quad (2.30)$$

wobei ω die Kreisfrequenz des Radars, sowie k_x und k_r die Wellenzahlen in Azimut und Entfernung bezeichnen. Aus geometrischen Gründen sind die Frequenzen und Wellenzahlen über den Zusammenhang

$$\omega = \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_r^2} \quad (2.31)$$

miteinander verbunden. In Gl. 2.30 sind die komplexen Amplituden Funktionen von k_x und ω und werden am Ort $r = 0$ durch $\tilde{\Psi}_{tot}(k_x, \omega, r = 0)$ ausgedrückt. Diese komplexen Amplituden lassen sich einfach aus $\psi_{tot}(x, t, r = 0)$, dem gemessenen Wellenfeld aus Gl. 2.29 über eine zweidimensionale FOURIER-Transformation ableiten [17],[196]:

$$\tilde{\Psi}_{tot}(k_x, \omega, r = 0) = \iint \psi_{tot}(x, t, r = 0) \exp(-i(\omega t + k_x x)) dt dx \quad . \quad (2.32)$$

Aufbauend auf die Darstellung aus Gl. 2.30 ist es nun die Aufgabe der Prozessierung das ursprüngliche Wellenfeld $\psi_{tot}(x, t = -t_0, r)$, so wie es zum Zeitpunkt $t = -t_0$ ausgesendet wurde, aus dem gemessenen Wellenfeld $\psi_{tot}(x, t, r = 0)$ zu rekonstruieren. Dazu führt man zuerst für alle Wellen eine Rückausbreitung im Ort von $r = 0$ in eine bestimmte Entfernung r durch. Für eine ebene Welle mit gegebenen ω und k_x entspricht die Rückausbreitung im Ort einer Phasenverschiebung, die durch Multiplikation mit $\exp(ik_r r)$ erreicht werden kann. Weiterhin lässt sich durch Umstellen von Gl. 2.31 k_r als Funktion von k_x und ω darstellen

$$k_r = \frac{2\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{k_x^2 c^2}{4\omega^2}} \quad . \quad (2.33)$$

Das rückausgebreitete Feld ist dann gegeben als

$$\psi_{tot}(x, t, r) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \tilde{\Psi}_{tot}(k_x, \omega, r = 0) \exp \left[i \left(k_x x + \omega t + \frac{2\omega r}{c} \sqrt{1 - \frac{k_x^2 c^2}{4\omega^2}} \right) \right] d\omega dk_x \quad (2.34)$$

Mit Gl. 2.34 ist das Wellenfeld in einer beliebigen Entfernung r zum Zeitpunkt des Empfangs gegeben. Um nun das initiale Feld $\psi_{tot}(x, -t_0, r)$ zum Zeitpunkt seiner Entstehung bei $t = -t_0$ zu bestimmen, muss eine zweite Rückausbreitung in der Zeit durchgeführt werden. Dies geschieht durch Auswertung von Gl. 2.34 zur Zeit $t = -t_0$

$$\psi_{tot}(x, -t_0, r) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \tilde{\Psi}_{tot}(k_x, \omega, r = 0) \exp \left[i \left(k_x x - \omega t_0 + \frac{2\omega r}{c} \sqrt{1 - \frac{k_x^2 c^2}{4\omega^2}} \right) \right] d\omega dk_x \quad (2.35)$$

Gl. 2.35 ist bereits eine Fokussierungsgleichung. Problematisch an dieser Formulierung ist jedoch seine parametrische Abhängigkeit von r : Das Integral müsste für jede Entfernung r individuell

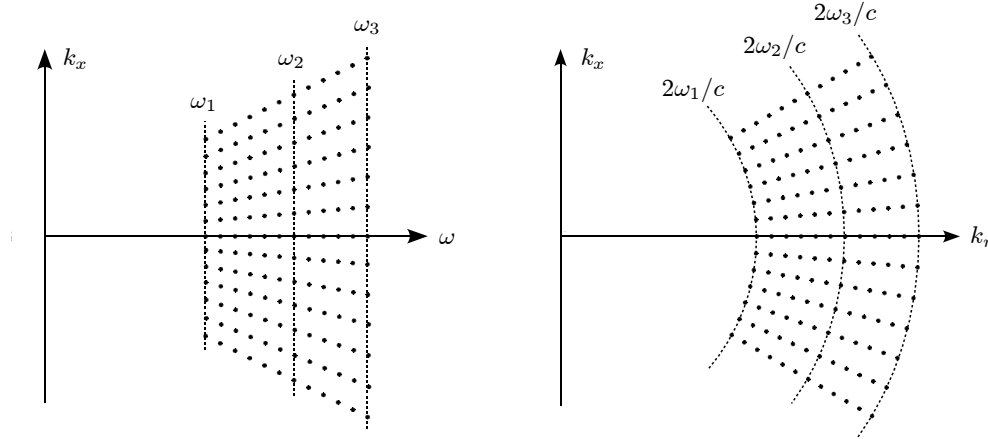


Abbildung 2.7: „STOLT-mapping“. Links: Spektral Darstellung der aufgezeichneten Rohdaten. Rechts: In den (k_r, k_x) -Bereich transformiertes Spektrum; das „STOLT-mapping“ interpoliert Datenwerte für Linien mit konstantem k_r , d.h. es führt eine Projektion von polaren auf kartesische Koordinaten im (k_r, k_x) -Bereich durch.

ausgewertet werden, was eine praktische Anwendung hochgradig ineffizient werden lässt. Daher ist es angebracht Gl. 2.35 in die Form einer zweidimensionalen FOURIER-Transformation umzustellen, indem man den Ausdruck aus Gl. 2.31 substituiert:

$$\begin{aligned} \psi_{tot}(x, -t_0, r) = & \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \tilde{\Psi}_{tot} \left(k_x, \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_r^2}, r = 0 \right) \\ & \cdot \exp(i(k_x x + k_r r)) \exp \left(-it_0 \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_r^2} \right) \frac{ck_r}{2\sqrt{k_x^2 + k_r^2}} dk_x dk_r \quad . \end{aligned} \quad (2.36)$$

Diese Substitution, bekannt als „STOLT-mapping“ [194], überführt das Problem in den k_r - k_x Wellenzahlbereich und löst auf diese Weise die parametrische Abhängigkeit von r . Dies erfordert allerdings eine Interpolation von Rohdatenwerten für $\omega = c/2\sqrt{k_x^2 + k_r^2}$. Anschaulich stellt das „STOLT-mapping“ eine Abbildung von Linien mit konstantem ω auf Kreise mit dem Radius $2\omega/c$ in dem (k_x, k_r) -Bereich dar (siehe Abb. 2.7). Als nichtlineare Interpolation ist das „STOLT-mapping“ keine triviale Operation und erfordert die Wahl hochgenauer Interpolationskerne, um eine korrekt zurückausgebreitete Wellenverteilung zu erzielen [84].

Die Lösung von Gl. 2.36 stellt die initiale Feldverteilung zum Zeitpunkt ihrer Entstehung dar und beschreibt damit auch die Verteilung der Streuer am Boden im Rahmen der mit dem System erzielbaren Auflösung. Gl. 2.36 kann daher als die Invertierung des Prozesses der Datenaufzeichnung angesehen werden, so wie sie im „radiating reflector“ Modell dargestellt wird. Das Ergebnis wird ohne jegliche Näherungen erzielt und berücksichtigt präzise die Effekte der „range cell migration“, des hyperbolischen Phasenverlaufs und der variierenden Wellenlänge innerhalb der abgestrahlten Pulse. Eine detaillierte Beschreibung der Wellenzahlprozessierung findet sich in [177].

Bewegungskompensation

Obwohl die ' ω - k ' Prozessierung ein bestechend einfaches wie genaues Verfahren ist, besitzt es doch einen großen Nachteil: Eine präzise zweistufige Bewegungskompensation, wie sie für die Pro-

zessierung von Daten flugzeuggetragener Sensoren unabdingbar ist, lässt sich in ihrem Rahmen nicht durchführen. Die Wellenzahlprozessierung ist daher nur für satellitengetragene Sensoren geeignet, wobei die hohe Genauigkeit dieser Methode heutzutage zumeist nicht erforderlich ist, und auch mit anderen Prozessierungsansätzen gute Ergebnisse erzielt werden können.

Vor dem „STOLT-mapping“ befinden sich die Daten im Zeitbereich und sind bereits in Entfernung fokussiert, was prinzipiell eine Bewegungskompensation ermöglicht. Allerdings ist an dieser Stelle der Prozessierung die RCM noch nicht korrigiert, wodurch sich gewisse Teile der Impulsantworten noch nicht in der richtigen Entfernung befinden. Daher kann an dieser Stelle nur die entfernungsunabhängige Korrektur, die Bewegungskompensation erster Ordnung, durchgeführt werden. Nach dem „STOLT-mapping“ ist die komplette Fokussierung bereits abgeschlossen, für eine Bewegungskompensation 2. Ordnung ist es nun zu spät. In der konventionellen ω - k -Prozessierung muss die RCM nicht separat kompensiert werden; sie wird vielmehr implizit durch den Prozess des „STOLT-mappings“ berücksichtigt.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass im normalen ω - k Prozessierungsschema eine entfernungsabhängige Bewegungskompensation 2. Ordnung nicht möglich ist, da an keiner Stelle die Rohdaten fokussiert in Entfernung, unfokussiert in Azimut und um die RCM korrigiert vorliegen. Zu diesem Zweck muss das Prozessierungskonzept entsprechend abgeändert werden. Dies ist Gegenstand des nächsten Abschnitts.

2.3 Der erweiterte Wellenzahlprozessor

Der erweiterte Wellenzahl Prozessor stellt eine Variante der klassischen Wellenzahlprozessierung dar, welche in der Lage ist, eine ähnliche zweistufige Bewegungskompensation durchzuführen, wie dies in verschiedenen populären SAR Prozessierungsmethoden möglich ist. Gleichzeitig werden aber die einmaligen Eigenschaften der Wellenzahlprozessierung, wie die genaue Verarbeitung extrem langer Aperturen und breitbandiger Signale, größtenteils bewahrt. Das Ergebnis ist eine neue Prozessierungsmethode, welche sich hervorragend für die Fokussierung von modernen hochauflösenden SAR Daten flugzeuggestützter Sensoren eignet, welche immer öfter Antennen mit weitem Öffnungswinkel sowie hohe Signalbandbreiten benutzen, um höchste Bildauflösungen zu erzielen. Der erweiterte Wellenzahl Prozessor ist daher gut geeignet, die Lücke zwischen Wellenzahlprozessoren und konventionellen FOURIER-Prozessoren zu füllen [170][2][164].

2.3.1 Das modifizierte Stolt-Mapping

Gl. 2.35 repräsentiert die Fokussierungsgleichung der Wellenzahlprozessierung. Wie zuvor beschrieben, wird sie üblicherweise aus Effizienzgründen durch Substitution von $\omega = \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_r^2}$ in ein zweidimensionales FOURIER-Integral umgestellt. In diesem Fall korrigiert das „STOLT-mapping“ die hyperbolische RCM und fokussiert das Bild. Im Folgenden soll eine Umstellung von Gl. 2.35 in ein alternatives FOURIER-Integral vorgestellt werden, welche die RCM Korrektur von der eigentlichen Azimutfokussierung separiert und somit eine zweistufige Bewegungskompensation erlaubt.

Durch Einfügen eines Nullterms lässt sich Gl. 2.35 folgendermaßen expandieren:

$$\psi_{tot}(x, -t_0, r) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \tilde{\Psi}_{tot}(k_x, \omega, r = 0) \exp(i(k_x x - \omega t_0))$$

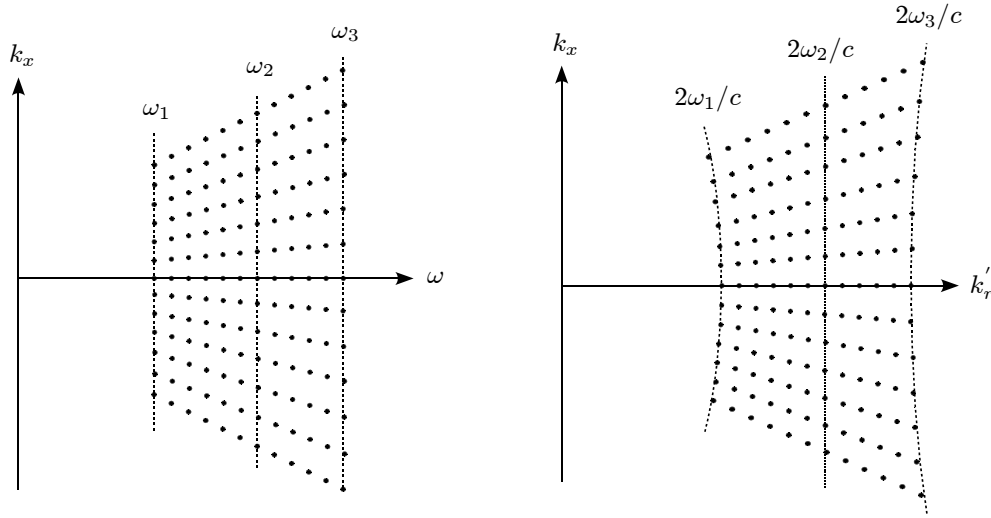


Abbildung 2.8: Modifiziertes „STOLT-mapping“. Links: Spektraldarstellung der aufgezeichneten Rohdaten. Rechts: Spektrum nach Transformation in den (k'_r, k_x) -Bereich, mit Kompensation für ω_0 .

$$\cdot \exp \left[ir \left(\sqrt{\left(\frac{2\omega}{c} \right)^2 - k_x^2} - \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c} \right)^2 - k_x^2} \right) \right] \exp \left[ir \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c} \right)^2 - k_x^2} \right] dk_x d\omega . \quad (2.37)$$

An diesem Punkt wird nun wiederum eine Variablensubstitution durchgeführt, die allerdings leicht von der ursprünglichen Substitution des „STOLT-mappings“ (Gl. 2.31) abweicht:

$$k'_r = \sqrt{\left(\frac{2\omega}{c} \right)^2 - k_x^2} - \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c} \right)^2 - k_x^2} \quad (2.38)$$

Diese Substitution stellt genau wie das „STOLT-mapping“ eine Interpolation des Datenspektrums dar. Aber anstatt Linien mit konstantem ω auf Kreise mit Radius $2\omega/c$ im (k_x, k_r) -Bereich abzubilden, wird durch das modifizierte „STOLT-mapping“ zusätzlich eine Frequenzverschiebung in der k'_r -Richtung verursacht⁵. Wie in Abb. 2.8 dargestellt, verursacht diese Frequenzverschiebung, dass alle Datenpunkte mit der Frequenz ω_0 auf einer Linie mit konstantem k'_r verbleiben.

Führt man die in Gl. 2.38 beschriebene Variablensubstitution in Gl. 2.37 durch so ergibt sich mit der Abkürzung $k_{r0} = 2\omega_0/c$ der folgender Ausdruck:

$$\begin{aligned} \psi_{tot}(x, -t_0, r) = & \frac{1}{(2\pi)^2} \int \exp \left[ir \sqrt{k_{r0}^2 - k_x^2} \right] \int \tilde{\Psi}_{tot} \left(k_x, \frac{c}{2} \sqrt{\left(k'_r + \sqrt{k_{r0}^2 - k_x^2} \right) + k_x^2}, r=0 \right) \\ & \cdot \exp \left[\frac{ict_0}{2} \sqrt{\left(k'_r + \sqrt{k_{r0}^2 - k_x^2} \right) + k_x^2} \right] \frac{c}{2} \frac{k'_r + \sqrt{k_{r0}^2 - k_x^2}}{\sqrt{\left(k'_r + \sqrt{k_{r0}^2 - k_x^2} \right) + k_x^2}} e^{i(k'_r r + k_x x)} dk'_r dk_x . \end{aligned} \quad (2.39)$$

⁵Die k'_r - und die k_r -Achse sind parallel, aber um $\sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c} \right)^2 - k_x^2}$ verschoben.

Der erste Exponentialterm in Gl. 2.39 hängt nur von r und der Azimutwellenzahl k_x und nicht mehr von der Radarfrequenz ω ab, welche bei breitbandigen Signalen stark variiert. Dieser Term ist für die Azimutfokussierung zuständig, nachdem RCM und Frequenzabhängigkeit kompensiert worden sind. Diese beiden Korrekturen erfolgen durch das zweite Integral in Gl. 2.39. Eliminiert man nun den Fokussierungsterm, so ist das Ergebnis ein Bild, bei dem die RCM korrigiert worden ist und die Azimutausdehnung und -position der Impulsantworten exakt denen in den Rohdaten entspricht. An dieser Stelle kann also eine entfernungsabhängige Bewegungskompensation 2. Ordnung durchgeführt werden.

Im Rahmen der konventionellen Wellenzahlprozessierung, so wie sie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben wurde, ließe sich eine ähnliche Situation durch Eliminierung des letzten Exponentialterms in Gl. 2.36 erreichen. In diesem Fall würde ebenfalls keine Azimutkompression erfolgen. Das verbleibende Integral würde jedoch die Variationen der azimutalen Chirpraten zwischen Nah- und Fernbereich korrigieren, indem die Längen der Impulsantworten entsprechend angepasst würden. Dies lässt sich in Gl. 2.36 daran erkennen, dass die zu entfernende Fokussierungsfunktion selber nicht mehr entfernungsabhängig ist. Da die Korrespondenz zwischen der Korrekturfunktion und der dazugehörigen Azimutposition dann nicht für alle Entfernungen gegeben ist, ist diese Variante nicht geeignet, um eine entfernungsabhängige Bewegungskompensation durchzuführen.

Nachdem im erweiterten Wellenzahlprozessor die entfernungsabhängige Bewegungskorrektur durchgeführt wurde, muss das Bild über eine eindimensionale FFT zurück in den Azimut-Wellenzahlbereich transformiert werden. Dort sorgt anschließend folgende entfernungsabhängige Phasenkorrektur

$$\Phi(r, k_x) = \exp \left[i r \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c} \right)^2 - k_x^2} \right] \quad (2.40)$$

für die Azimutfokussierung. Schließlich wird noch eine inverse FFT in Azimut benötigt, um das Bild in den Zeitbereich zu übertragen.

Zusammenfassend sind die folgenden Schritte für das Konzept der erweiterten Wellenzahlprozessierung notwendig:

1. Entfernungskompression der Daten, falls ein frequenzmodulierter Puls (Chirp) verwendet wurde
2. Bewegungskompensation 1. Ordnung (entfernungsunabhängig)
3. Zweidimensionale FOURIER-Transformation in den k_x - ω -Bereich
4. Modifiziertes STOLT-mapping (Wechsel vom k_x - ω in den k_x - k'_r -Bereich)
5. Zweidimensionale FOURIER-Transformation in den x - r -Bereich (Zeitbereich)
6. Bewegungskompensation 2. Ordnung (entfernungsabhängig)
7. Eindimensional FOURIER-Transformation in den k_x - r -Bereich
8. Azimutfokussierung (entfernungsabhängig)
9. Inverse eindimensionale FOURIER-Transformation in den x - r -Bereich

Ein alternativer Weg, um das zuvor präsentierte erweiterte ' ω - k '-Konzept abzuleiten, basiert auf einem *Azimuthexpansion* genannten Prozessierungsschritt nach Durchführung des konventionellen „STOLT-mappings“. Hierbei werden die Rohdaten zuerst über die konventionelle Wellenzahlprozessierung fokussiert, wobei eine entfernungsunabhängige Bewegungskompensation 1. Ordnung nach der Entfernungsfokussierung durchgeführt wird. Statt einer zweidimensionalen inversen FFT nach dem „STOLT-mapping“, wird aber nun nur eine eindimensionale inverse FFT in Entfernungsrichtung angewandt. Die Daten befinden sich dann im k_x - r -Bereich, wobei RCM und Wellenlängenabhängigkeit bereits kompensiert sind. Im Azimut-Zeitbereich sind die Daten fokussiert, d.h. gut lokalisiert.

Um eine korrekte Bewegungskompensation 2. Ordnung durchzuführen, muss die Azimutausdehnung der Impulsantworten in einer Art und Weise angepasst werden, dass sie in allen Entfernungen identisch zu der Originalausdehnung in den Rohdaten werden. Die Phasenhistorie eines Ziels in der Entfernung r vom Sensor beträgt

$$\Phi(r, x) = \frac{2\omega_0}{c} \sqrt{r^2 + x^2} \quad . \quad (2.41)$$

woraus sich dazugehörige Wellenzahl in Azimut

$$k_x = \frac{\partial \Phi(r, x)}{\partial x} = \frac{2\omega_0}{c} \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \quad (2.42)$$

ergibt. Aus Gl. 2.42 folgt, dass für eine Wellenzahl k_x das Signal um

$$x = \frac{k_x r}{\sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c}\right)^2 - k_x^2}} \quad (2.43)$$

in Azimut verschoben werden muss. Dies kann durch Multiplikation mit der Phasenfunktion

$$\Phi(r, k_x) = \int x \, dk_x = r \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c}\right)^2 - k_x^2} \quad (2.44)$$

erreicht werden. Daher werden die Daten nach Anwendung des konventionellen „STOLT-mappings“ durch eine eindimensionale inverse FFT in Entfernungsrichtung in den k_x - r -Bereich überführt. Dann werden die Daten mit dem Phasenterm aus Gl. 2.44 multipliziert, gefolgt von einer FFT in Azimut. Dies führt zu einer Datenrepräsentation, bei der die Impulsantworten der Ziele RCM-korrigiert und in Azimut auf ihre Originallänge in den Rohdaten ausgedehnt vorliegen. Eine entfernungsabhängige Bewegungskompensation 2. Ordnung kann nun durchgeführt werden. Nach diesem Schritt ist eine weitere Azimut-FFT nötig, um in der Lage zu sein, die Daten durch Multiplikation mit der Inversen von Gl. 2.44 zu fokussieren. Schließlich führt eine inverse Azimut-FFT zu dem Bildergebnis im Zeitbereich.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Phasenfunktion von Gl. 2.44 linear in der Entfernung ist. Sie entspricht daher einer Frequenzverschiebung in der k_r -Richtung. Diese Verschiebung kann auch direkt während des „STOLT-mappings“ durchgeführt werden, was die zwei

zusätzlichen FFTs vermeidet. Diese Variante führt exakt auf Gl. 2.39: Der Betrag der sich durch Gl. 2.44 ergebenden Frequenzverschiebung in k_r -Richtung beträgt

$$\Delta k_r = \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c}\right)^2 - k_x^2} \quad . \quad (2.45)$$

Vergleicht man dies mit dem modifizierten „STOLT-mapping“ aus Gl. 2.38, wird der identische Variablenwechsel

$$k_r' = k_r - \Delta k_r \quad (2.46)$$

offensichtlich. Die Phasenkorrekturen für die Azimutfokussierung nach der Bewegungskompensation 2. Ordnung, dargestellt in Gl. 2.40 und 2.44, sind ebenfalls identisch. Die beiden Ansätze, einerseits die Verwendung eines modifizierten „STOLT-mappings“ und andererseits die Verwendung eines zusätzlichen Schritts zur Azimutexpansion, sind daher grundsätzlich identisch.

2.3.2 Bewegungskompensation 3. Ordnung

Wie bereits erwähnt, wird bei der Wellenzahlprozessierung das Bildergebnis ohne Näherungen erzielt; insbesondere wird auch der Effekt der innerhalb des frequenzmodulierten Pulses variierenden Wellenlänge berücksichtigt. Dieser prinzipielle Vorteil der Wellenzahlprozessierung hat gewisse Auswirkungen auf die korrekte Anwendung der Bewegungskompensation im Fall einer hohen Entfernungsbandsbreite.

In den Rohdaten ist die azimutale Ausdehnung der Impulsantworten für alle Wellenlängen innerhalb der Entfernungsbandsbreite identisch. Ihre Chirpraten unterscheiden sich allerdings geringfügig aufgrund der leicht verschiedenen Wellenlänge. Sowohl in der konventionellen Wellenzahlprozessierung, wie auch in der erweiterten Wellenzahlprozessierung wird dies im Rahmen des „STOLT-mappings“ berücksichtigt, welches alle Chirpraten an die der Zentralfrequenz ω_0 anpasst. Daher erfordert auch die eigentliche Azimutfokussierung (Gl. 2.40) nur noch diese Zentralfrequenz, um eine ideale Kompression für alle Wellenlängen des Signals zu erzielen. Diese Anpassung der Chirpraten durch das „STOLT-mapping“ ändert aber selbstverständlich nicht die DOPPLER-Bandsbreite des Signals; die Anpassung geschieht vielmehr durch entsprechende Änderung der Ausdehnung der Impulsantworten in Azimut. Dieser Effekt ist in Abb. 2.9 dargestellt: Um die verschiedenen Chirpraten anzupassen, werden Signalanteile mit einer kürzeren Wellenlänge als der zentralen in Azimut gestreckt, während Signalanteile mit längerer Wellenlänge entsprechend in Azimut gestaucht werden.

Obwohl dieser Effekt prinzipiell große Vorteile bei der Fokussierung von breitbandigen SAR Daten bietet, treten Probleme auf, wenn Bewegungsfehler in den Daten vorhanden sind. In den Rohdaten wirkt sich ein Bewegungsfehler an einer bestimmten Stelle der Sensortrajektorie auch genau an dieser Stelle der Rohdaten aus, und zwar für alle Wellenlängen des Chirps (vergleiche Abb. 2.9c). Wie in Abb. 2.9d illustriert, ändert das modifizierte „STOLT-mapping“ zum Teil diese Position; nur die Signalanteile mit λ_0 verbleiben an ihrer korrekten Azimutposition. Bei der normalen Durchführung der Bewegungskompensation 2. Ordnung, wie in Gl. 2.28 beschrieben, werden daher nur die Phasen der Signalanteile mit λ_0 korrekt korrigiert. Für alle anderen Wellenlängen wird der Bewegungsfehler einer falschen Azimutposition zur Kompensation benutzt.

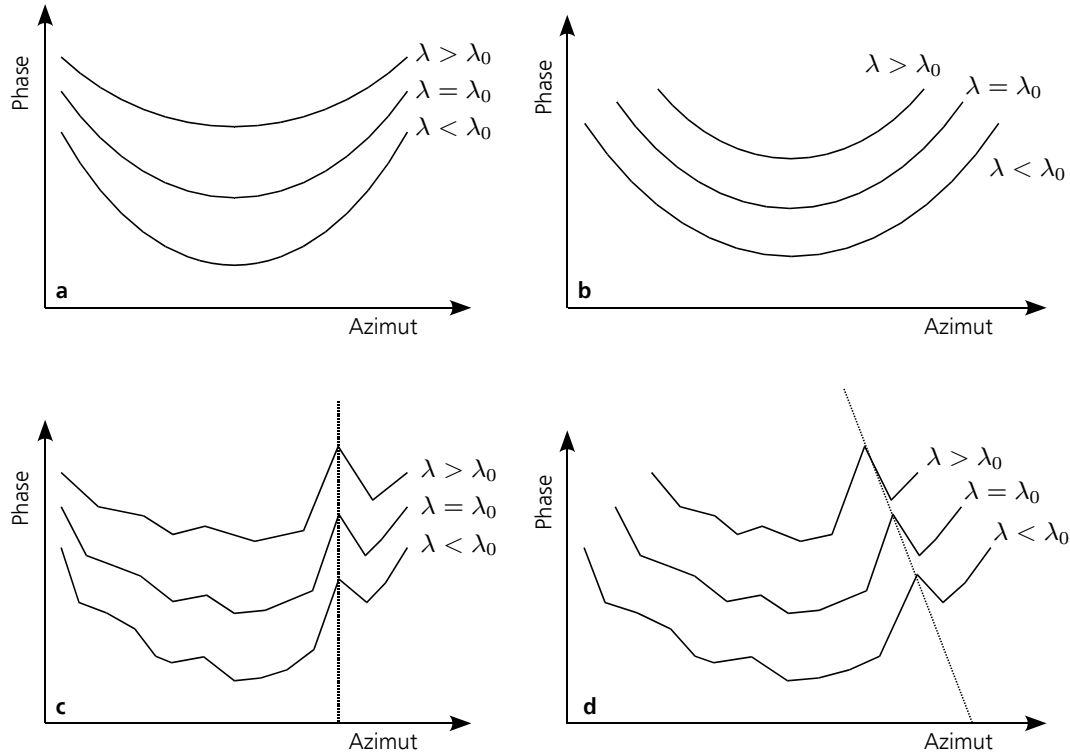


Abbildung 2.9: a) In den Rohdaten haben die Impulsantworten aller Wellenlängen die gleiche Länge, aber verschiedene Chirpraten. b) Nach dem modifizierten „STOLT-mapping“ sind die Chirpraten identisch, aber nicht die Ausdehnungen in Azimut. c) Wie a), aber mit Bewegungsfehlern. Ein Bewegungsfehler erscheint in allen Wellenlängen an der selben Position in Azimut. d) Nach dem modifizierten „STOLT-mapping“ variieren die Orte des Bewegungsfehlers mit der Wellenlänge.

Wichtig ist an dieser Stelle, die prinzipiellen Unterschiede in der Azimutfokussierung mit Bewegungskompensation, zwischen einem Wellenzahlprozessor und einem Standardprozessor, wie dem ECS Algorithmus, hervorzuheben. Ein Standardprozessor berücksichtigt die Wellenlängenvariationen innerhalb der Impulsantwort in Azimut nicht. Für die Bewegungskompensation befinden sich die Daten in der in Abb. 2.9c dargestellten Repräsentation. Bewegungskompensation kann an dieser Stelle problemlos durchgeführt werden, wobei gewisse Fehler durch den für $\omega \neq \omega_0$ falsch angepassten Kompressionsfilter und durch die Variationen der Bewegungskompensation mit dem Squintwinkel auftreten [149]. In der erweiterten Wellenzahlprozessierung treten keinerlei Fehler in der Fokussierung aufgrund der variierenden Radarfrequenz auf, aber nun ist die Bewegungskompensation für $\omega \neq \omega_0$ falsch angepasst. Für kleine relative Bandbreiten und relativ niederfrequente Bewegungsfehler funktioniert die erweiterte Wellenzahlprozessierung zwar hinreichend gut. Für allgemeinere Systemparameter ist aber ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt in der Bewegungskompensation nötig, um eine hohe Bildqualität sicherzustellen.

Unter Verwendung von Gl. 2.43 kann die durch das modifizierte „STOLT-mapping“ hervorgerufene Azimutverschiebung eines Bewegungsfehlers bei einer bestimmten Frequenz ω analytisch abgeleitet werden:

$$\Delta x(r, k_x, \omega) = x(r, k_x, \omega_0) - x(r, k_x, \omega) = r \left(\frac{k_x}{\sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c}\right)^2 - k_x^2}} - \frac{k_x}{\sqrt{\left(\frac{2\omega}{c}\right)^2 - k_x^2}} \right) \quad (2.47)$$

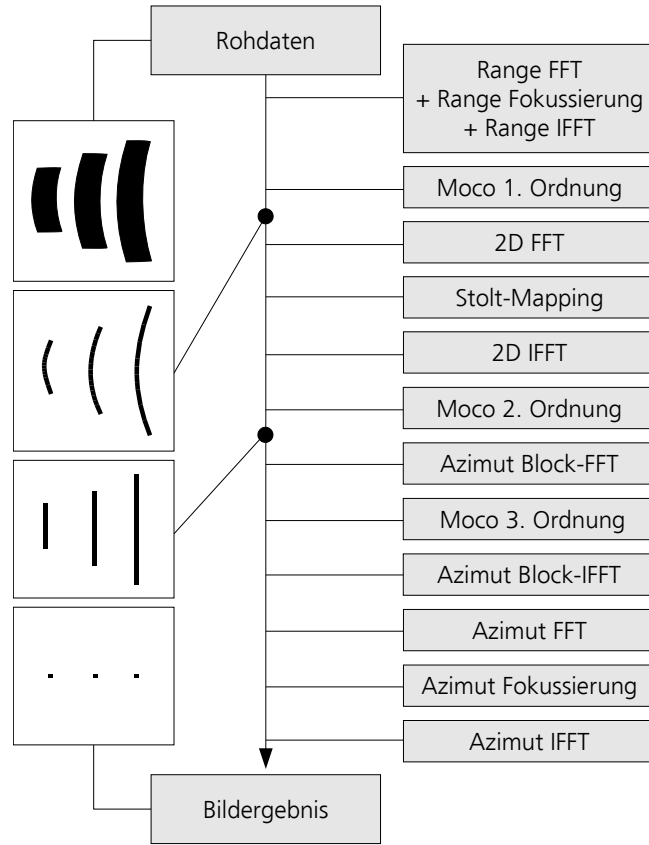


Abbildung 2.10: Blockdiagramm des kompletten erweiterten Wellenzahlprozessors. Links: Schematische Repräsentation von drei Punktzuständen an verschiedenen Zeitpunkten der Prozessierung (Entfernung horizontal, Azimut vertikal)

Nach dem modifizierten „STOLT-mapping“ sind die Daten im k_x - k'_r -Bereich und Gl. 2.38 muss in Gl. 2.47 substituiert werden, um Werte für $\Delta x(r, k_x, k'_r)$ zu erhalten:

$$\Delta x(r, k_x, k'_r) = r \left(\frac{k_x}{\sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c}\right)^2 - k_x^2}} - \frac{k_x}{k'_r + \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c}\right)^2 - k_x^2}} \right) \quad (2.48)$$

Diese Verschiebung hängt ab von r , k_x und k'_r ; der Bewegungsfehler selber variiert mit x , r und genau genommen auch mit k_x . Daher kann der beschriebene Effekt nur näherungsweise über einen Blockprozessierungsansatz kompensiert werden.

Für die Bewegungskompensation 3. Ordnung müssen die Daten zuerst mittels blockweiser FFTs, z.B. der Größe 64x64, in den k_x - k'_r -Bereich transformiert werden. Dies stellt einerseits eine Sensitivität auf Entfernungs- und Azimutposition und andererseits auf die Wellenzahlen in Azimut und Entfernung sicher. Jeder dieser Blöcke deckt 64 verschiedene Azimutwellenzahlen k_{xi} und 64 Wellenzahlen in Entfernung k'_{rj} ab und kann einer gewissen mittleren Entfernung r_c und mittleren Azimutposition x_c seines zentralen Pixels zugeordnet werden. Damit kann, unter Verwendung von Gl. 2.48, die dazugehörige Azimutverschiebung $\Delta x(r_c, k_{xi}, k'_{rj})$ für jedes Element des Blocks bestimmt werden.

Für eine korrekte Durchführung der Bewegungskompensation 3. Ordnung muss natürlich berücksichtigt werden, dass die Bewegungskompensation 1. und 2. Ordnung bereits durchgeführt

worden sind. Die Bewegungskompensation 1. Ordnung fand vor dem modifizierten „STOLT-mapping“ statt, und seine Phasenkorrekturen wurden daher auch an der korrekten Azimutposition angebracht. Die Bewegungskompensation 2. Ordnung fand nach dem modifizierten „STOLT-mapping“ statt, mit allen zuvor beschriebenen Implikationen. Die Bewegungskompensation 3. Ordnung kann daher wie folgt ausgedrückt werden:

$$C_3(x_c, r_c, k_{xi}, k'_{rj}) = \exp \left[\frac{2i\omega_0}{c} \left(\Delta r(x_c + \Delta x(r_c, k_{xi}, k'_{rj}), r_c) - \Delta r(x_c, r_c) - \Delta r(x_c + \Delta x(r_c, k_{xi}, k'_{rj}), r_m) + \Delta r(x_c, r_m) \right) \right] \quad (2.49)$$

Jedes Blockelement wird im Frequenzbereich mit C_3 multipliziert, bevor es wieder durch eine weitere blockweise FFT zurück in den Zeitbereich übertragen wird. Ein Blockdiagramm des gesamten erweiterten Wellenzahlprozessors ist in Abb. 2.10 abgebildet.

Die Phasenkorrektur von Gl. 2.49 ist Null für $k_{xi} = 0$ und für $k'_{rj} = k_{r0}$, also für die Mitte des Blocks. Dies minimiert die Phasensprünge an den Blockgrenzen, die andernfalls ernsthafte Fehler in den resultierenden Impulsantworten hervorrufen würden. Trotzdem stellte es sich als nötig heraus, mit überlappenden Blöcken (ca. 25%-50%) und einem fließenden Übergang zwischen ihnen zu arbeiten, um optimale Prozessierungsergebnisse zu erhalten.

Es muss angemerkt werden, dass die Bewegungskompensation 3. Ordnung keine analytisch exakte Lösung darstellt, da sie eine Blockverarbeitung in Entfernung und Azimut benötigt. Hochfrequente Bewegungsfehler können aufgrund der begrenzten Zeitauflösung nicht präzise korrigiert werden. Allerdings wird bereits während der Bewegungskompensationen 1. und 2. Ordnung, die beide bei voller Auflösung durchgeführt werden, der größte Teil des Fehlers eliminiert. Die Bewegungskompensation 3. Ordnung ist nur nötig, um die in der erweiterten Wellenzahlprozessierung auftretenden Restfehler zu korrigieren.

2.3.3 Winkelabhängigkeit der Bewegungskompensation

Während der Bewegungskompensation werden die Daten um einen Phasenterm proportional zu der Abweichung Δr der realen Flugbahn von einer Referenzflugbahn korrigiert [132]. Bei vielen Sensorsystemen, insbesondere bei solchen, die mit kurzen Wellenlängen wie dem X-Band arbeiten, ist nur eine relativ kurze synthetische Apertur zur Erzielung hoher Auflösungen nötig. In diesem Fall ist es meist ausreichend, nur den Bewegungsfehler senkrecht zur Flugbahn, bzw. in Richtung des mittleren Squintwinkels zu kompensieren [130]. Bei langen synthetischen Aperturen hingegen ist die Variation des Bewegungsfehlers mit dem Squintwinkel nicht mehr vernachlässigbar. Werden solche Daten mit einer winkelunabhängigen Bewegungskompensation prozessiert, kommt es zu Phasenfehlern, welche die erzielbare Azimutauflösung limitieren und geometrische Verzerrungen im Bild erzeugen.

In Abb. 2.11 ist diese Problematik illustriert. Bei Vorhandensein einer langen synthetischen Apertur beobachtet der Sensor von einer einzigen Azimutposition mehrere Objekte mit deutlich verschiedenem Squintwinkel. Für ein Objekt, welches unter Squintwinkel Null erfasst wird, entspricht der Laufwegunterschied zwischen der tatsächlichen und der nominellen Sensorposition Δr dem senkrechten Abstand zwischen wahren Track und Referenztrack. Ein anderes Objekt, welches gleichzeitig von derselben Sensorposition, aber mit dem Squintwinkel β erfasst wird, weist einen anderen, um den Faktor $\cos \beta$ verkürzten, Laufwegunterschied auf [9].

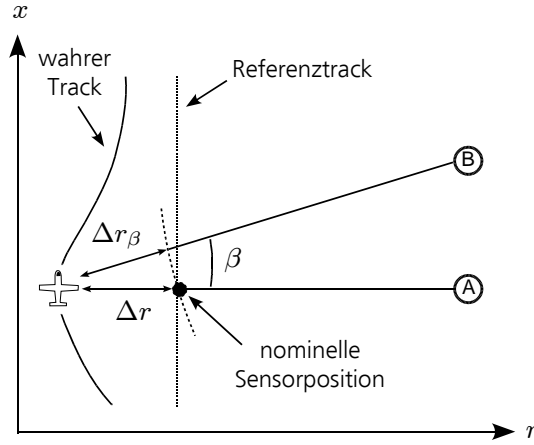


Abbildung 2.11: Bei gleichem Bewegungsfehler erfordert Ziel A unter Squintwinkel Null eine andere Bewegungskorrektur Δr als das mit Squintwinkel β erfasste Ziel B, welches (gleichzeitig) um $\Delta r_\beta = \Delta r \cos \beta$ korrigiert werden muss.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erläutert, hängt der Squintwinkel β direkt mit der DOPPLER-Frequenz in Azimut zusammen. Eine Möglichkeit, eine squintwinkeladaptive Bewegungskompensation durchzuführen, ist daher, die Daten im Rahmen einer Blockprozessierung zu korrigieren. Dazu werden die Daten nach der Bewegungskompensation und nach der Entfernungsfokussierung in den Azimut-Frequenzbereich überführt. Dort kann, entsprechend der Azimutposition des Blocks und dem zur jeweiligen DOPPLER-Frequenz gehörigen Squintwinkel β , eine Korrektur um

$$\Delta r_{corr}(\beta) = \Delta r_{block} (\cos \beta - 1) \quad (2.50)$$

vorgenommen werden, wobei Δr_{block} den eigentlichen Bewegungsfehler für die Mitte des jeweiligen Blocks bezeichnet. Ein solcher Ansatz ist im Prinzip generisch für fast alle auf der Verarbeitung im Frequenzraum basierenden Prozessierungsverfahren und erfordert zwei zusätzliche FOURIER-Transformationen. Er kann gleichermaßen während der Bewegungskompensation 1. und 2. Ordnung angewandt werden [149][158].

Da die Daten im Rahmen des erweiterten Wellenzahlprozessors ohnehin während der Bewegungskompensation 3. Ordnung blockweise in den k_x - k_r -Bereich transformiert werden müssen, sind in diesem Prozessierungsverfahren keine zusätzlichen FOURIER-Transformationen nötig, um die Variationen des Bewegungsfehlers während der Azimutintegration zu berücksichtigen. Wie oben erläutert, lässt sich der Bewegungsfehler unter einem gewissen Squintwinkel β von dem DOPPLER-Null Bewegungsfehler durch Multiplikation mit dem Kosinus des Squintwinkels erhalten. Um eine squintwinkelabhängige Bewegungskompensation durchzuführen, muss daher der erste Δr -Term in Gl. 2.49 mit

$$\cos \beta_{ij} = \sqrt{1 - \left(\frac{k_{xi}}{2\omega_{ij}/c} \right)^2} = \sqrt{1 - \frac{k_{xi}}{\sqrt{k_{xi}^2 + \left(k'_{rj} + \sqrt{\left(\frac{2\omega_0}{c} \right)^2 - k_{xi}^2} \right)^2}}} \quad (2.51)$$

multipliziert werden, falls mit einem mittlerem Squintwinkel von Null prozessiert wird, bzw. mit der Differenz zwischen $\cos \beta_{ij}$ und dem Kosinus des mittleren Squintwinkels falls nicht. Da

dieser Verarbeitungsschritt bei dem erweiterten Wellenzahlprozessor die gesamte Effizienz kaum beeinflusst, ist diese zusätzliche Korrektur auch bei nur kleinen Squintwinkelvariationen sinnvoll.

2.3.4 Experimentelle Ergebnisse

Simulierte Rohdaten

Um die Leistungsfähigkeit des vorgestellten erweiterten Wellenzahlprozessors zu evaluieren, wurden Prozessierungen von simulierten Rohdaten eines flugzeuggetragenen Sensors vorgenommen. Hierbei wurden zwei verschiedene Szenarios untersucht: Ein im VHF-Band arbeitender Sensor mit einer Azimutaufösung im Subwellenlängenbereich, sowie ein hochauflösender X-Band Sensor. Um die Leistungsfähigkeit unter für flugzeuggetragene Sensoren realistischen Bedingungen zu testen, wurden signifikante Bewegungsfehler in die Simulation mit einbezogen. In beiden Szenarios wurde die Abweichung von einer idealen, linearen Flugbahn während der Datenaufzeichnung mit $\pm 10\text{m}$ in horizontaler und vertikaler Richtung festgelegt. Als typische Schwingungsperiode des Bewegungsfehlers wurden 700m verwendet. Diese Werte sind typisch für ein kleineres Flugzeug, welches in niedrigen Flughöhen um 10000ft arbeitet und entsprechen in etwa dem Doppelten des Bewegungsfehlers, der sich normalerweise bei Befliegungen mit dem E-SAR Sensor des DLRs ergibt. In Abb. 2.12 wird der in den VHF- und X-Band Simulationen verwendete vertikalen Bewegungsfehler gezeigt. Das VHF-Szenario ist mit herkömmlichen schnellen Prozessierungsmethoden prinzipiell nur ungenau zu fokussieren, bei dem X-Band Szenario versagen zumindest konventionelle Wellenzahlprozessoren aufgrund des Vorhandenseins von Bewegungsfehlern. Die genauen simulierten Sensorparameter sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Die simulierten Rohdaten bestehen aus mehreren Punktzielen, die an verschiedenen Orten in Entfernung und Azimut innerhalb der prozessierten Szene angeordnet sind. Um eine fokussierte Punktzielantwort zu erhalten, die nicht von benachbarten Zielen beeinflusst wird, wurde darauf geachtet, dass keine Überlappung zwischen den von den simulierten Punktzielen eingenommenen Rohdatenbereichen besteht. Die folgenden Abbildungen 2.13, 2.14 und 2.15 gehören zu einem Punktziel, welches in Azimut in der Mitte der Szene gelegen ist und sich in einer Entfernung von 6350m (VHF) bzw. 4310m (X-Band) zum Sensor befindet. In allen Fällen wurde eine isotrope Antennencharakteristik benutzt und keinerlei spektrale Gewichtungsfunktionen verwendet.

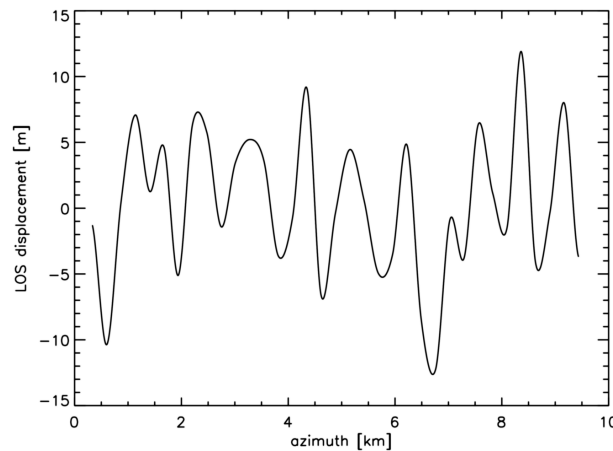


Abbildung 2.12: Vertikale Bewegungsfehler des simulierten VHF-Szenarios

Tabelle 2.1: Parameter der simulierten Rohdatenszenarien

Parameter	VHF	X-band
Wellenlänge	2,5m	0,025m
Bandbreite	30 MHz	400 MHz
Chirpdauer	6 μ s	1.5 μ s
Abtastfrequenz	50 MHz	500 MHz
PRF	150 Hz	4kHz
Geschwindigkeit	100,0 m/s	200,0 m/s
Auflösung Azimut	1,25m	0,15m
Strahlbreite Azimut	60°	4,8°
Flughöhe	3000m	3000m
Entfernung	4000m-10140m	3500m-4730m
Zielentfernung	6350m	4310m

Abb. 2.13 zeigt links die ideale 2D Impulsantwort des VHF Szenarios. Diese Antwortfunktion wurde von Rohdaten ohne Bewegungsfehler mit Hilfe eines konventionellen Wellenzahlprozessors erhalten und ist als Referenz anzusehen. Aufgrund der im VHF-Fall sehr breiten Antennenstrahlbreite von 60° kommt es zu signifikanten Kopplungseffekten zwischen Entfernungs- und Azimutrichtung, mit dem Ergebnis, dass sich eine in Entfernung nicht völlig symmetrische ideale Impulsantwort ergibt. In Abb. 2.13 rechts ist zum Vergleich die sich mit dem erweiterten Wellenzahlprozessor ergebene Impulsantwort gezeigt, für den Fall des Auftretens von Bewegungsfehler wie in Abb. 2.12. Diese Impulsantwort ist der idealen Antwort sehr ähnlich, und es finden sich nur einige minimale Verzerrungen.

In Abb. 2.14 und 2.15 sind die Impulsantworten in Azimutrichtung für das VHF- und das X-Band Szenario dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den erweiterten Wellenzahlprozessor ein Großteil der Bewegungsfehler korrigiert werden kann. In Tabelle 2.2 finden sich einige Parameter der Impulsantworten, wie räumliche Auflösung, Haupt-Nebenkeulenverhältnis (PSLR⁶) und integriertes Nebenkeulenverhältnis (ISLR⁷). Im VHF Fall mit Bewegungsfehlern ergeben sich PSLR und ISLR Werte, die um weniger als 1dB vom idealen Fall abweichen. Gleichzeitig wird der theoretische Maximalwert für die räumliche Auflösung nahezu perfekt erreicht. Der erweiterte Wellenzahlprozessor scheint daher sehr gut zur Fokussierung von VHF Daten bis auf Auflösungen in der Größenordnung der Wellenlänge geeignet zu sein.

Auch für das simulierte X-Band Szenario können sehr gute Fokussierungsergebnisse erzielt werden. Allerdings scheint der Algorithmus hier bereits an seine Grenzen zu stoßen. Betrachtet man die PSLR-Werte, so stellt man fest, dass nicht alle Bewegungsfehler aus den Daten entfernt werden konnten. Geht man zu noch höheren Auflösungen über, oder simuliert man noch stärkere Bewegungsfehler, so degradieren die Impulsantworten noch stärker. Aufgrund der wesentlich kürzeren Wellenlänge im X-Band bewirken Bewegungsfehler einer gegebenen Größe wesentlich

⁶engl: *peak-sidelobe ratio*. Verhältnis der Intensität der Hauptkeule zur ersten Nebenkeule

⁷engl: *integrated sidelobe ratio*. Verhältnis der Fläche der Hauptkeule zur Gesamtfläche aller Nebenkeulen

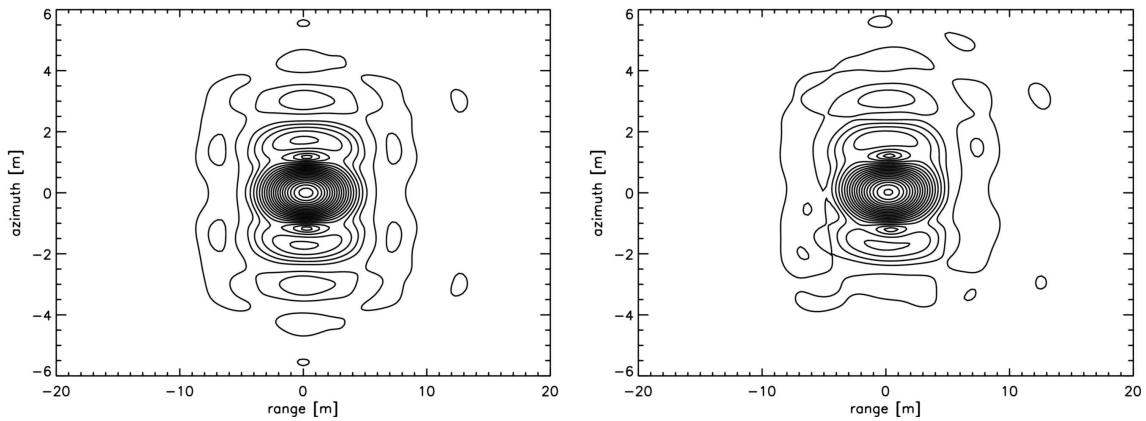


Abbildung 2.13: VHF Szenario. Links: Ideale 2D Impulsantwort, erzielt aus Daten ohne Bewegungsfehlern mit Hilfe eines konventionellen Wellenzahlprozessors. Rechts: 2D Impulsantwort, erzielt aus Daten mit Bewegungsfehlern mit Hilfe des erweiterten Wellenzahlprozessors.

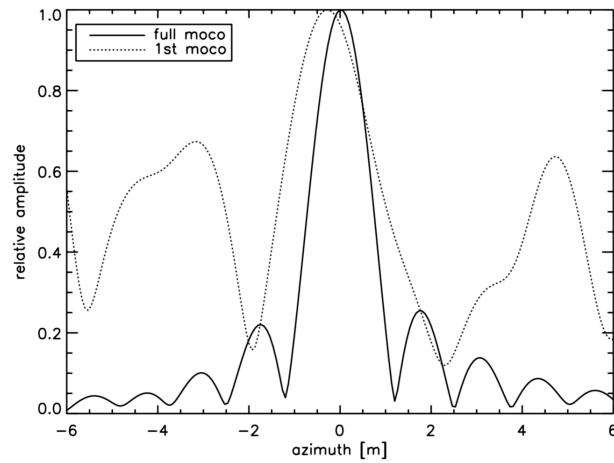


Abbildung 2.14: VHF Simulation. Gepunktete Linie: Impulsantwort in Azimut von Rohdaten mit Bewegungsfehlern nach Prozessierung mit einem konventionellen Wellenzahlprozessors mit Bewegungskompensation 1. Ordnung. Durchgezogene Linie: Gleiche Daten prozessiert mit dem erweiterten Wellenzahlprozessor mit voller 3-stufiger Bewegungskompensation.

Tabelle 2.2: Simulationsergebnisse der erweiterten Wellenzahlprozessierung

Parameter	VHF	VHF (ideal)	X-band	X-band (ideal)
Auflösung	1,29m	1,25m	0,156m	0,150m
ISLR	10,05dB	9,86dB	9,96dB	10,33dB
PSLR links	14,20dB	13,02dB	16,44dB	13,48dB
PSLR rechts	12,82dB	13,02dB	11,30dB	13,48dB

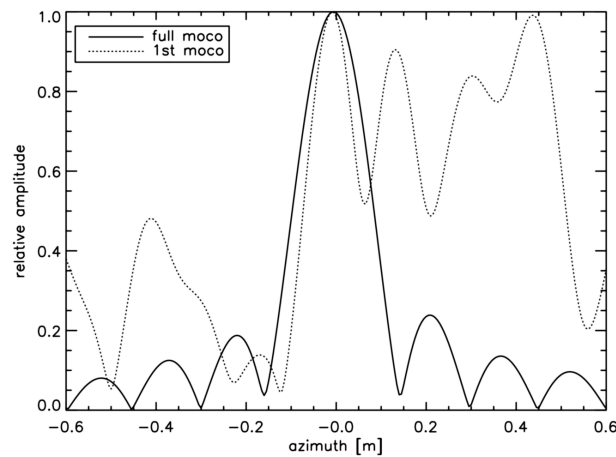


Abbildung 2.15: X-Band Simulation. Gepunktete Linie: Impulsantwort in Azimut von Rohdaten mit Bewegungsfehlern nach Prozessierung mit einem konventionellen Wellenzahlprozessors mit Bewegungskompensation 1. Ordnung. Durchgezogene Linie: Gleiche Daten prozessiert mit dem erweiterten Wellenzahlprozessor mit voller 3-stufiger Bewegungskompensation.

stärkere Phaseneffekte als im VHF Bereich, welche auch entsprechend genau kompensiert werden müssen. Die beschriebene Implementation einer blockweisen Bewegungskompensation 3. Ordnung ist für diesen Zweck nicht genau genug. Der erweiterte Wellenzahlprozessor in seiner momentanen Form erscheint daher nicht ideal zu sein, um X-Band Daten mit starken Bewegungsfehlern bis auf Subdezimeter-Auflösungen zu prozessieren.

Reale Rohdaten

Die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit der erweiterten Wellenzahlprozessors wurde des weiteren an interferometrischen repeat-pass Daten im L-Band erprobt, die vom experimentellen SAR System (E-SAR) des DLRs [89] über dem Testgebiet Oberpfaffenhofen aufgenommen wurden. Die interferometrische Basislinie beträgt bei diesem Datensatz etwa 10m; im L-Band besitzt das E-SAR eine Bandbreite in Entfernung von 100MHz und eine Strahlbreite in Azimut von etwa 7.5° . Daten mit einer solchen Charakteristik können problemlos mit Standardalgorithmen, aber nicht mit einem konventionellen Wellenzahlprozessor prozessiert werden, der nur eine Bewegungskompensation 1. Ordnung bietet. Aufgrund eines Mangels an 'extremere' realen Daten wurde dieser Datensatz für die Evaluierung des Algorithmus ausgewählt.

Zuerst wurden die Daten beider Überflüge mit dem erweiterten Wellenzahlprozessor fokussiert. Abb. 2.16a und 2.16b zeigen die Bildamplituden der ersten Aufnahme. Das Bild erscheint gut fokussiert, unabhängig von der betrachteten Entfernungs- oder Azimutposition. Ein konventioneller Wellenzahlprozessor würde hier ein in manchen Regionen stark defokussiertes Bild liefern, insbesondere im Nah- und Fernbereich des Bildes, wo die Bewegungskompensation 1. Ordnung ungenau ist. Dies ist hier nicht der Fall, was die praktische Anwendbarkeit der vorgestellten Konzepts beweist.

Ein besserer Test für die Genauigkeit und Phasenstabilität des Algorithmus ist die Qualität der resultierenden interferometrischen Phase (siehe auch Kapitel 4). Um aus den beiden Aufnahmen ein Interferogramm zu erzeugen, müssen die Aufnahmen präzise koregistriert werden. Dies erfolgte durch ein sogenanntes *spectral diversity* Verfahren [183] mit anschließender Neuabtastung

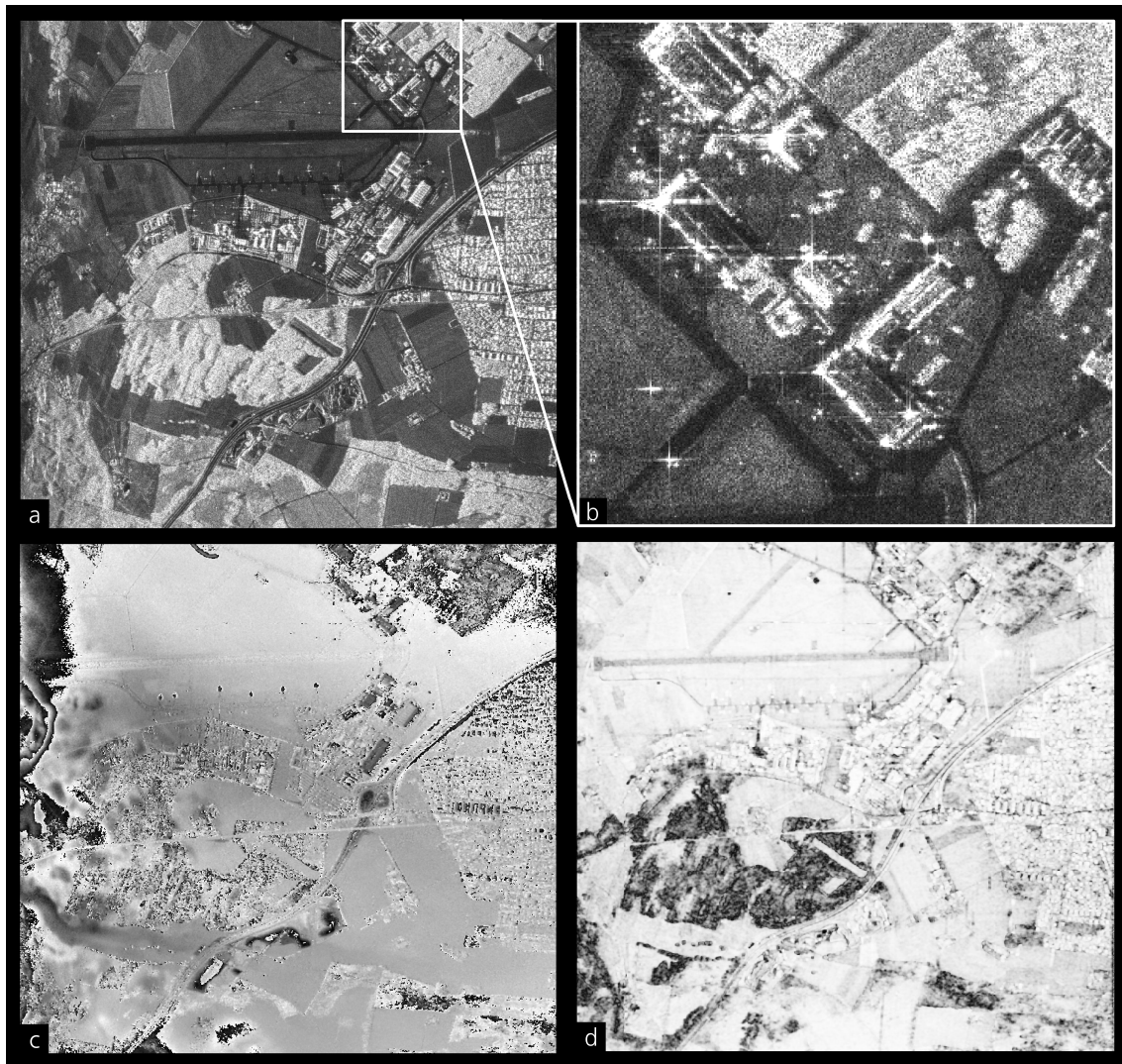


Abbildung 2.16: Reale L-Band Daten des E-SAR Sensors, prozessiert mit dem erweitertem Wellenzahlprozessor. a) Bildamplitude, ohne Verwendung spektraler Gewichtungen. b) Vergrößerung eines Bereichs, der hauptsächlich große industrielle Strukturen zeigt (Flugzeughangars) c) Interferometrische Phase (schwarz= $-\pi$, weiß= $+\pi$). d) Interferometrische Kohärenz (schwarz=0.0, weiß=1.0).

der zweiten Aufnahme. Aufgrund der zur Verfügung stehenden sehr guten Bewegungsdaten des Sensors ergab sich lediglich eine maximale Missregistrierung der Aufnahmen von 0.5 Bildpixeln (ca. 0.2m) in Azimut. Dies unterstützt die Beobachtung, dass die Bewegungsfehler genau kompensiert wurden, da andernfalls signifikante Bildverzerrungen zu erwarten gewesen wären.

Die interferometrische Phase und Kohärenz sind wichtige Parameter, um die Phasenstabilität des Algorithmus zu evaluieren. Die interferometrische Phase, zu finden in Abb.2.16c, besitzt eine hohe Qualität ohne signifikante Modulationen durch eventuell in den Daten verbliebenen Bewegungsfehlern. Ein Vergleich mit interferometrischen Phasen, die von dem gleichen Datenmaterial mit einem Standardprozessor erzeugt wurden, ergibt keine signifikanten Unterschiede. Der Medianwert der in Abb. 2.16d gezeigten Kohärenz beträgt 0,94. Da die Kohärenz ein sehr

empfindliches Maß für das Phasenrauschen und die allgemeine Prozessierungsqualität ist, suggeriert dieser hohe Wert, der nahe am theoretischen Maximum von 1,0 liegt, dass die erweiterte Wellenzahlprozessierung in diesem Fall sehr gute Ergebnisse erbracht hat. Direkte Prozessierungsartefakte können in der Kohärenzkarte nicht entdeckt werden; alle dekorrelierten Gebiete sind Regionen mit hoher temporaler Dekorrelation, wie z.B. Waldflächen.

2.4 Schlussfolgerungen

Im vorherigen Kapitel wurde eine wichtige Erweiterung des etablierten Konzepts der Wellenzahlprozessierung vorgestellt. Mit ihr wird es möglich, mit einem hochgenauen Wellenzahlprozessor eine vollständige, entfernungsabhängige Bewegungskompensation ähnlich wie mit dem ECS Prozessor durchzuführen. Dies ist insofern bedeutsam, da hiermit die Wellenzahlprozessierung auch für flugzeuggestützte SAR Sensoren attraktiv wird. Bislang war dies nicht möglich, da eine einstufige, entfernungsunabhängige Bewegungskompensation für hochauflösende Anwendungen nicht ausreichend ist. Der Wellenzahlprozessor selbst benötigt keine Näherungen und ist in der Lage, mit beliebig langen Aperturen in Azimut sowie beliebig großen Bandbreiten umzugehen. Auch bestehen keine prinzipiellen Einschränkungen bezüglich hoher Squintwinkel. Dies gilt gleichermaßen für den erweiterten Wellenzahlprozessor. Dieser basiert zwar auf gewisser Näherungen, aber nur im Bezug auf die Bewegungskompensation, nicht in Bezug auf die Fokussierung selbst.

Die Leistungsfähigkeit des neuen Prozessierungskonzepts wurde an simulierten VHF und X-Band Daten sowie an realen interferometrischen Daten im L-Band des experimentellen SAR Sensors des DLR's demonstriert. Es wurde gezeigt, dass es mit dem vorgestellten Konzept möglich ist, trotz deutlicher Bewegungsfehler VHF Daten bis auf Auflösungen kleiner als die Wellenlänge zu prozessieren, ohne eine signifikante Degradierung der Impulsantwort zu beobachten. Auch X-Band Daten können bis auf Auflösungen unter einem Meter prozessiert werden.

Die Effizienz des Algorithmus ist sehr hoch und nur geringfügig niedriger als die des ECS Algorithmus. Daher erscheint das erweiterte Wellenzahlkonzept insbesondere für die Prozessierung sehr hochauflösender niederfrequenter SAR Daten geeignet; ein Problem, welches üblicherweise den Einsatz zeitaufwendiger Zeitbereichsprozessoren verlangt [204]. Eine weitere Anwendung könnte die Prozessierung von Daten mit hohem Squint sein. Hier kommt es, durch die im Gegensatz zum Wellenzahlkonzept nötigen Näherungen, bei nahezu allen Methoden zu einer starken Degradation der Bildqualität.

Die wichtigste Einschränkung des vorgeschlagenen Algorithmus sind die für die Bewegungskompensation nötigen Näherungen, ein charakteristisches Problem aller FOURIER-Raum basierten Algorithmen. Eine genaue Bewegungskompensation ist erst nach dem STOLT-mapping möglich, bei welchem aber Interpolationsfehler durch die noch vorhandenen Bewegungsfehler auftreten. Außerdem kann die Bewegungskompensation 3. Ordnung nur blockweise durchgeführt werden, was eine genaue Behandlung hochfrequenter Bewegungsfehler, wie z.B. Vibrationen, verhindert. Wie man an den Ergebnissen mit realen SAR Daten erkennen kann scheint das aber, zumindest bei nicht zu extremen Sensorparametern, keine zu große Einschränkung darzustellen.

Allgemein stellt der erweiterte Wellenzahlprozessor das fehlendes Bindeglied zwischen der schnellen ECS Prozessierung und der hochgenauen Zeitbereichsprozessierung dar: Daten mit moderaten Aperturlängen und geringem mittleren Squintwinkel lassen sich gut mit einem ECS Prozessor

fokussieren. Für Daten mit Aperturwinkeln von nahe 180° und sehr hohen Entfernungsbandbreiten wird man sicherlich auch weiterhin der Zeitbereichsprozessierung den Vorrang geben. Für den Zwischenbereich, d.h. bei Aperturwinkeln bis zu 90° und mittleren relativen Bandbreiten, erscheint hingegen die erweiterte Wellenzahlprozessor eine erfolgsversprechende Alternative zu sein.

3 SAR Polarimetrie

3.1 Grundlagen

Ein wichtige Ergänzung der einkanaligen SAR Fernerkundung ist die Verwendung polarisierter Wellen. Ein polarimetrisches SAR System misst das von der Szene zurückgestreute elektrische Feld inklusive seines Polarisationszustands, welcher von der Wechselwirkung der ausgestrahlten Welle mit den jeweiligen Objekten bestimmt wird. Die Polarisation der zurückgestreuten Welle hängt dabei sowohl von der Polarisation der ausgestrahlten Welle als auch von den physikalischen Streueigenschaften der Streuer ab. Dies erlaubt es, zusätzliche Informationen über die Streuer zu sammeln und auf diese Weise beispielsweise mehrere sich überlagernde Rückstreumechanismen zu unterscheiden. Die SAR Polarimetrie ist für sich alleine gesehen bereits eine multimodale Technik, da bei ihr die Szene in mehreren polarimetrischen Kanälen aufgezeichnet wird. Sie kann allerdings auch mit weiteren multimodalen Ansätzen kombiniert werden. In Kapitel 3.2 wird eine Zeit-Frequenz Analyse von polarimetrischen Daten vorgenommen, um zusätzliche Informationen über anisotrope polarimetrische Rückstreuung zu erlangen. Des weiteren sind in der Literatur zahlreiche Ansätze der Verschneidung von SAR Interferometrie und SAR Polarimetrie beschrieben [143][192][32][6].

3.1.1 Konzepte der SAR Polarimetrie

Die Polarisation einer elektromagnetischen Welle beschreibt das Verhalten des oszillierenden elektrischen Feldvektors \vec{E}_{tot} . Aufgrund der transversalen Natur elektromagnetischer Wellen liegt \vec{E}_{tot} immer in der Ebene orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Jede mögliche Polarisation der Welle lässt sich in eine Linearkombination zweier Komponenten in dieser Ebene darstellen

$$\vec{E}_{tot} = \vec{h}E_h + \vec{v}E_v \quad , \quad (3.1)$$

wobei E_h und E_v die Projektionen von \vec{E}_{tot} auf die Einheitvektoren \vec{h} und \vec{v} bezeichnen, die die Polarisationsbasis bilden. Die Projektionen E_h und E_v sind komplexwertige Größen und beschreiben den Polarisationszustand einer Welle im Fernfeld. Der aus ihnen gebildete komplexe Vektor $\vec{J} = [E_h, E_v]$ wird als JONES-Vektor bezeichnet [91][80]. Eine monochromatische Welle bekommt durch die Berücksichtigung der Polarisation zwei neue Freiheitsgrade, beispielsweise beschrieben durch das Amplitudenverhältnis zwischen E_h und E_v , sowie deren Phasenunterschied. Die häufig auftretenden linearen Polarisationszustände sind durch einen Phasenunterschied von Null gekennzeichnet. Benutzt man horizontale und vertikale Polarisationen als Basis, so wird eine horizontal polarisierte Welle durch $|E_v| = 0$ und eine vertikale durch $|E_h| = 0$ ausgedrückt. Links und rechts zirkular polarisierte Wellen entstehen, wenn $|E_h|$ gleich $|E_v|$ ist und ein Phasenunterschied von $\pm 90^\circ$ vorliegt. Alle anderen Kombinationen von Amplitudenverhältnis und Phasenunterschied führen zu elliptischen Polarisationen [135].

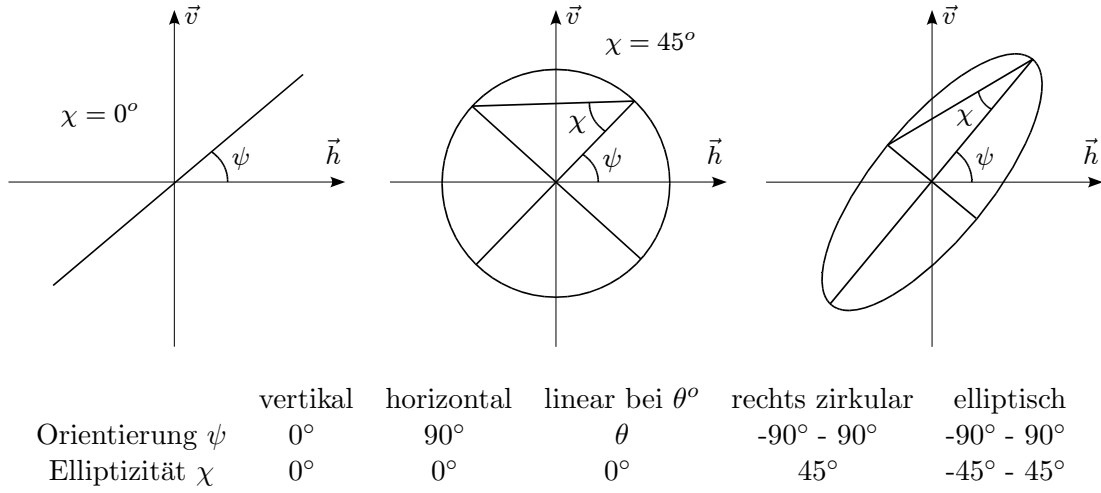


Abbildung 3.1: Oben links: Lineare Polarisation (Bedingung: $\chi = 0^\circ$), ψ legt die Polarisationsrichtung fest. Oben Mitte: Zirkulare Polarisation (Bedingung: $\chi = 45^\circ$), ψ ist ohne Bedeutung. Oben rechts: Elliptische Polarisation, χ beschreibt die Elliptizität, ψ die Orientierung der Ellipse. Unten: Beispiele für χ und ψ .

Verbreitet wird auch eine alternative Beschreibung von Polarisationen über den Orientierungswinkel ψ und die Elliptizität χ verwendet, so wie in Abb. 3.1 dargestellt [16]. Sie leitet sich aus dem JONES-Vektor über die Gleichung

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix} = A \exp(i\phi_0) \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \chi \\ i \sin \chi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

wobei A und ϕ die Amplitude und Phasenlage, also die polarisationsunabhängigen Parameter der Welle, bezeichnen.

In der Fernerkundung untersucht man die Streuung von Wellen, d.h. im Fall der SAR Polarimetrie die Änderung der Wellenpolarisation zwischen ausgesandter und empfangener Welle. Das hier verwendete grundlegende Konzept sind die komplexen 2x2 Streu- oder SINCLAIR-Matrizen \mathbf{S} , welche die Transformation des ausgesendeten JONES-Vektors \vec{E}^t in den empfangenen JONES-Vektor \vec{E}^r beschreiben [188][206]:

$$\begin{pmatrix} E_h^r \\ E_v^r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{pmatrix} = \mathbf{S} \vec{E}^t \quad (3.3)$$

Bei Verwendung einer horizontalen/vertikalen Polarisationsbasis bezeichnen E_h^t und E_v^t hierbei die horizontal und die vertikal polarisierte Komponenten des ausgesendeten Felds, sowie E_h^r und E_v^r die des empfangenen. Diese Streumatrix hat generell den Vorteil, dass sie vom Sensor direkt durch eine Sequenz von unterschiedlich polarisierten Sende- und Empfangspulsen gemessen werden kann. Zum Beispiel misst man S_{hh} , indem man einen horizontal polarisierten Puls aussendet und auch horizontal polarisiert empfängt und S_{vh} , indem man horizontal sendet und vertikal empfängt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass im Fall von reziproker Rückstreuung und symmetrischen Streuern davon ausgegangen werden kann, dass die beiden Nichtdiagonalelemente von \mathbf{S} identisch sind [13], was bei monostatischen Fernerkundungssystemen in der Regel der

Fall ist. Die Streumatrix beschreibt die komplette polarimetrische Signatur eines deterministischen Punktstreuers für eine bestimmte Frequenz und für eine bestimmte Blickrichtung. Viele elementare Streuprozesse besitzen eine charakteristische Streumatrix und können so über ihre polarimetrische Signatur identifiziert werden.

Ein alternativer Formalismus der polarimetrischen Streuung setzt dagegen auf eine vektorielle Formulierung [12][90][102]. In diesem Ansatz wird die Streumatrix durch einen dreidimensionalen Streuvektor \vec{k}_3 dargestellt, der durch Projektion der Streumatrizen auf einen Satz orthonormaler Basismatrizen eines dreidimensionalen Vektorraums gewonnen wird¹

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \vec{k}_3 = \text{Spur}(\mathbf{S}\tilde{\mathbf{Y}}) = [k_0, k_1, k_2]^T, \quad (3.4)$$

wobei $\tilde{\mathbf{Y}}$ den Vektor der Basismatrizen und $\text{Spur}(\dots)$ die Spurbildung bezeichnet. Durch die Gleichheit von S_{hv} und S_{vh} (siehe oben) ist im Rückstreungsfall ein dreidimensionaler Raum für die Vektorisierung von \mathbf{S} ausreichend. Diese Operation entspricht einer Dekomposition der Streumatrix in drei elementare deterministische Streuprozesse. Der Basisvektor $\tilde{\mathbf{Y}}$ ist dabei nicht eindeutig; es gibt mehrere Möglichkeiten eine gegebene Streumatrix in ihre Komponenten aufzuspalten[34][103][104]. In der Literatur werden vor allem zwei Basen bevorzugt, Die erste ist die sogenannte *lexikographische Basis* [15][14][90]:

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{\mathbf{L}} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right). \quad (3.5)$$

In dieser Basis leitet sich der generierte Streuvektor direkt aus \mathbf{S} ab:

$$\vec{k}_{3L} = [S_{hh}, \sqrt{2}S_{hv}, S_{vv}]^T. \quad (3.6)$$

Der Hauptvorteil dieser Basis ist, dass sie sich direkt aus den Observablen des Systems ableitet. Der lexikographische Streuvektor wird somit direkt vom Sensor gemessen. Dennoch ist für eine Unterscheidung elementarer Streuprozesse die lexikographische Basis nicht unbedingt ideal. Der zweite bedeutende Satz von Basismatrizen wird von den drei PAULI-Spinmatrizen gebildet [145][28][34]:

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{\mathbf{P}} = \sqrt{2} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right). \quad (3.7)$$

Der dazugehörige Streuvektor hat die Form:

$$\vec{k}_{3P} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, 2S_{hv}]^T. \quad (3.8)$$

Der Vorteil der PAULI-Basis liegt in der engen Beziehung der Elemente seines Streuvektors zu drei grundlegenden Streumechanismen [28]. Der erste Streumechanismus, beschrieben durch die erste

¹Ursprünglich aus der Tensoralgebra kommend, ist die Spurbildung einer Matrixmultiplikation eine Möglichkeit, die Projektion einer Matrix auf eine andere zu definieren

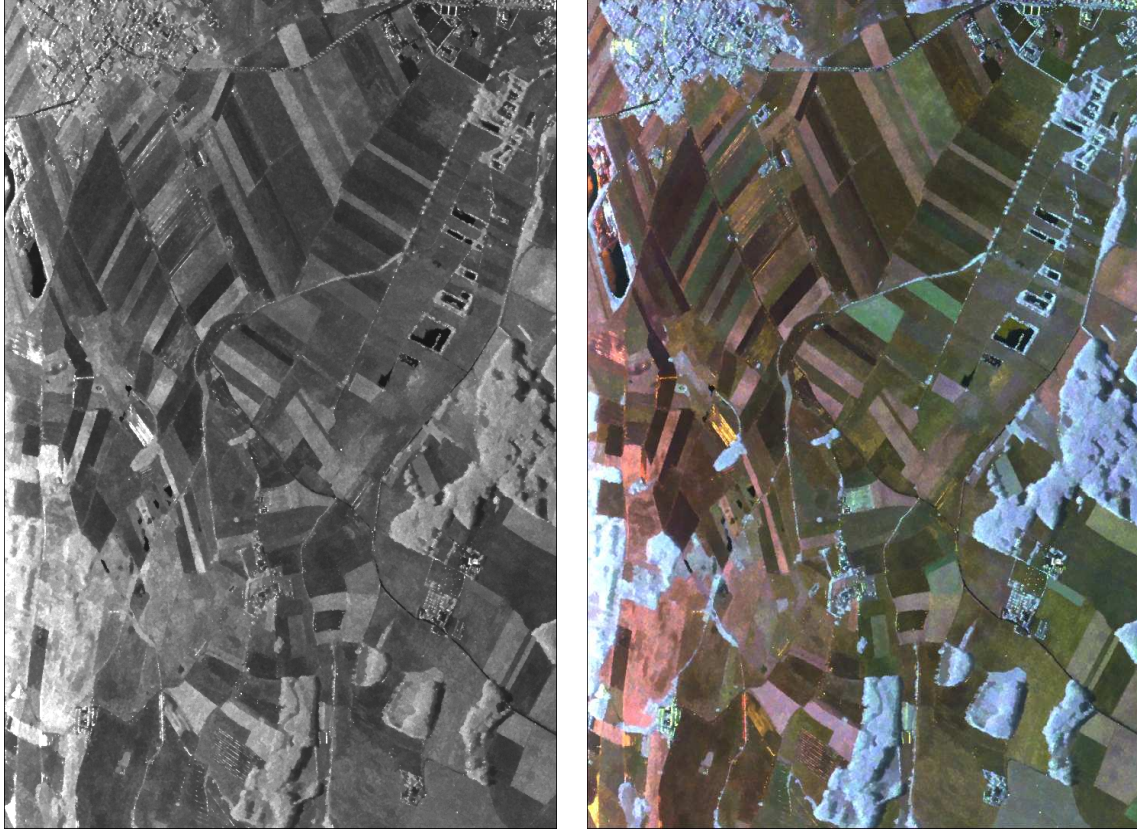


Abbildung 3.2: Links: Einkanalige SAR Aufnahme (HH Kanal) des Testgebiets Alling / Oberbayern. Rechts: Polarimetrisches Farbkomposit in der PAULI-Basis (rot: HH+VV, grün: HH-VV, blau: 2*HV)

PAULI-Matrix, ist die isotrope, ungradzahlige Rückstreuung, wie sie z.B. bei idealisierten ebenen Oberflächen oder bei trihedralen Winkelreflektoren auftritt. Die zweite PAULI-Matrix bezieht sich auf isotrope, gradzahlige Rückstreuung, wie z.B. Doppelreflektionen. Die dritte Komponente entspricht isotroper, gradzahliger Streuung, deren Symmetrieachse relativ zur Blickrichtung des Sensors rotiert ist. Auch die Rückstreuung eines Volumens mit zufälliger Anordnung der Einzelstreuer führt zu einer hohen Rückstreuung in der dritten PAULI-Komponente.

Allgemein kann jeder idealisierte Streumechanismus durch einen komplexen Vektor \vec{w} in der gewählten Basis beschrieben werden. So wird beispielsweise isotrope, gradzahlige Streuung durch den Vektor $[1, 0, 0]$ in der PAULI-Basis dargestellt. Um den Beitrag eines bestimmten Streumechanismus \vec{w} zu dem gemessenen Streuvektors \vec{k}_3 zu bestimmen, projiziert man \vec{k}_3 auf \vec{w} :

$$\mu = \vec{w}^\dagger \cdot \vec{k}_3 \quad , \quad (3.9)$$

wobei \dagger den Operator des Adjungierens² bezeichnet. In Gl. 3.9 bezeichnet μ die komplexe Streuamplitude des gewählten Streumechanismus. Auf diese Weise kann die gemessene Streumatrix in einen beliebigen Satz von orthogonalen Streumechanismen zerlegt werden, wobei aufgrund der Dimensionalität des Problems im allgemeinen nur 3 Komponenten unterschieden werden können.

²komplex konjugiert transponiert

Die bisher beschriebenen Konzepte der Streumatrix bzw. des Streuvektors sind allerdings nur ausreichend, wenn in einem Auflösungselement nur ein einzelner deterministischer Streuer vorliegt. Nur in diesem Fall wird die Streuung komplett durch die Streumatrix beschrieben. In allen anderen Fällen liegen sogenannte verteilte Ziele bzw. Flächenstreuer vor, deren Rückstreuung von der kohärenten Überlagerung vieler räumlich verteilter Einzelstreuer bestimmt wird. Die allermeisten natürlichen Oberflächen fallen in diese Klasse. Im Prinzip müsste hier jeder Einzelstreuer durch eine Streumatrix beschrieben werden; beobachtet wird aber nur die Summe aller diese Individualmatrizen einer Auflösungszelle. Zwei unterschiedliche Pixel von exakt der gleichen Oberfläche können somit zu völlig verschiedenen Streumatrizen führen, da die räumliche Verteilung der Individualstreuer nicht identisch ist.

Flächenstreuer werden, im Gegensatz zu deterministischen Streuern, zusätzlich durch ihre polarimetrische Korrelationseigenschaften beschrieben, welche nicht durch eine einzelne Streumatrix ausgedrückt werden können [138]. Eine Möglichkeit, eine statistische Beschreibung in den Formalismus der SAR Polarimetrie einzuführen, ist die Verwendung von *Kovarianz*- oder *Kohärenz*-Matrizen [12][29]. Sie sind definiert als der Erwartungswert des äußeren Produkts des Streuvektors in der lexikographischen bzw. in der PAULI-Basis. Für den Fall reziproker Rückstreuung ist die Kovarianzmatrix \mathbf{C}_3 gegeben als

$$\mathbf{C}_3 = \langle \vec{k}_{3L} \vec{k}_{3L}^\dagger \rangle = \begin{bmatrix} \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2 \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \end{bmatrix} , \quad (3.10)$$

und analog die Kohärenzmatrix \mathbf{T}_3 als

$$\mathbf{T}_3 = \langle \vec{k}_{3P} \vec{k}_{3P}^\dagger \rangle , \quad (3.11)$$

wobei $\langle \dots \rangle$ eine lokale räumliche Mittelwertbildung bezeichnet. Die effektive Anzahl der dabei verwendeten Pixel bezeichnet man auch als *Looks* von \mathbf{C} oder \mathbf{T} . Beide Matrizen enthalten beschreiben vollständig den polarimetrischen Streuprozess in Form von Statistiken 2. Ordnung, wie den Varianzen und den Korrelationskoeffizienten zwischen allen Elementen von \mathbf{S} .

Die Eigenvektoranalyse der Kohärenzmatrix \mathbf{T}_3 bildet die Basis einer bedeutenden Klasse polarimetrischer Dekompositionen [33][34]. Aufgrund der räumlichen Mittelung bei der Bildung von \mathbf{T}_3 kann im allgemeinen davon ausgegangen werden, dass \mathbf{T}_3 den vollen Rang 3 besitzt, wohingegen $\vec{k}_{3P} \vec{k}_{3P}^\dagger$ alleine nur einen eindimensionalen Unterraum aufspannt. Definitionsgemäß ist \mathbf{T}_3 eine hermitesche positiv semidefinite Matrix, die daher diagonalisierbar ist und positive reelle Eigenwerte besitzt. Sie kann daher als Summe von drei unabhängigen Eigenmatrizen geschrieben werden, die mit ihrem jeweiligen Eigenwert gewichtet sind

$$\mathbf{T}_3 = \sum_{i=1}^3 \mathbf{T}_{3,i} = \lambda_1(\vec{e}_1 \vec{e}_1^\dagger) + \lambda_2(\vec{e}_2 \vec{e}_2^\dagger) + \lambda_3(\vec{e}_3 \vec{e}_3^\dagger) , \quad (3.12)$$

wobei λ_i die Eigenwerte von \mathbf{T}_3 und \vec{e}_i die dazugehörigen orthonormalen Eigenvektoren bezeichnet. In Gl. 3.12 können die Eigenwerte als die Amplitude von Streuprozessen, die jeweils durch den dazugehörigen Eigenvektor beschrieben werden, interpretiert werden. Dies führt zu einem

weiteren wichtigen Messwert in polarimetrischen Analysen, der sogenannten polarimetrischen Streuentropie H_p [33]. Sie ist definiert als

$$H_p = \sum_{i=1}^3 -P_i \log_3 P_i \quad \text{mit} \quad P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^3 \lambda_j} \quad 0 \leq H_p \leq 1 \quad (3.13)$$

und kann als Komplexität des Streuprozesses interpretiert werden. Mögliche Werte für die Entropie liegen zwischen null und eins. Eine Entropie von null bedeutet, dass nur ein dominanter Eigenwert und damit nur ein dominanter Streuprozess aufgetreten ist. Eine hohe Entropie nahe eins hingegen kommt vor, wenn drei ähnlich große Eigenwerte vorliegen; dies ist der Fall, wenn sich mehrere ähnlich starke Streuprozesse überlagern.

Prinzipiell findet die Eigenzerlegung mathematisch drei orthogonale Streukomponenten, ohne ihnen direkt speziellen Streueigenschaften zuzuordnen. Die Interpretation der drei extrahierten Eigenvektoren ist daher ein weiterer wichtiger Schritt. Gemäß dem *Point Reduction Theorem* [189] lässt sich ein beliebiger dreidimensionaler komplexer Vektor, und damit auch die Eigenvektoren von \mathbf{T}_3 , in Form eines Satzes von 5 Winkel ausdrücken

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_p & \exp(i\phi_1) \\ \sin \alpha_p \cos \beta_p \exp(i\phi_2) \\ \sin \alpha_p \sin \beta_p \exp(i\phi_3) \end{bmatrix} . \quad (3.14)$$

Gl. 3.14 drückt aus, dass jeder Streuvektor durch Rotationen um die Winkel α_p und β_p sowie durch Anwendung der Phasenwinkel der Streuung ϕ_i aus dem Vektor $[1, 0, 0]^T$ gebildet werden kann [27]. Es konnte gezeigt werden, dass die beiden Winkel α_p und β_p eine direkte physikalische Interpretation besitzen, sofern die PAULI-Basis für die Vektorisierung von \mathbf{S} verwendet wurde. Der Winkel β_p entspricht dann der Orientierung der Streuer relativ zur Blickrichtung des Sensors und kann für die Bestimmung der Geländesteigung in Azimut benutzt werden [186][114]. Der α_p -Winkel hingegen enthält Informationen über die Art des aufgetretenen Streuprozesses und besitzt Werte zwischen 0° und 90° . Ein Winkel von 0° entspricht einer isotropen flachen Oberfläche ($S_{hh} = S_{vv}$), ein Winkel von 45° einer Dipol-Rückstreuung und ein Winkel von 90° einer isotropen Doppelreflektion ($S_{hh} = -S_{vv}$) [27].

3.1.2 Klassifikation polarimetrischer Daten

Die SAR Polarimetrie erlaubt eine Unterscheidung physikalisch verschiedener Streuprozesse und damit eine Identifikation unterschiedlicher Landbedeckungen. Sie ist damit generell gut geeignet, um eine Klassifikation der Daten, d.h. eine Gruppierung ähnlich erscheinender Oberflächen, in gemeinsame Klassen vorzunehmen. In der Literatur sind eine Vielzahl solcher Klassifikationsalgorithmen beschrieben. Viele dieser Algorithmen arbeiten überwacht, d.h. sie bestimmen zuerst für jede Klasse Prototyp-Merkmalvektoren, basierend auf Messungen über Flächen mit bekannter Klassenzugehörigkeit. Anschließend wird das verbliebene unbekannte Terrain mit diesen Prototypvektoren verglichen und mit Hilfe einer statistische Entscheidung die Klassenzugehörigkeit festgelegt [176][222][209][111]. Verwenden lassen sich dazu die verschiedensten polarimetrischen Parameter, aber auch die Kovarianzmatrizen selbst.

Ein etwas anderer Weg wird bei unüberwachten Klassifikationen verfolgt. Hier versucht der Algorithmus selbstständig, d.h. ohne Vorhandensein von Referenzmessungen, eine Gruppierung

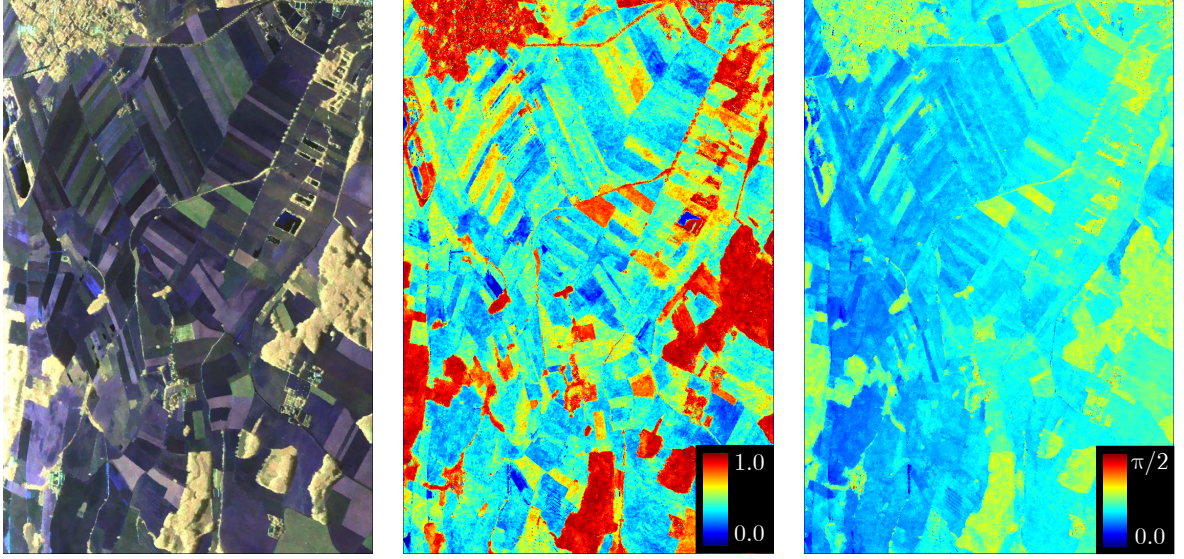


Abbildung 3.3: Links: Farbkomposit der Eigenwerte der Szene aus Abb. 3.2, rot = λ_1 , grün = λ_2 , blau = λ_3 . Mitte: Polarimetrische Streuentropie H_p der Szene. Rechts: Darstellung des α_p -Winkels der Szene

in ähnliche Klassen vorzunehmen [176]. Wichtige Vorteile unüberwachter Klassifikationen sind der hohe Automatisierungsgrad und die Unabhängigkeit von der Qualität der Referenzmessungen. In der SAR Polarimetrie beruht eine wichtige Klasse unüberwachter Algorithmen auf der Analyse physikalischer Streueigenschaften. So wird in [208] ein Klassifikationschema abgeleitet, welches die Szene in drei Rückstreuklassen - ungradzahlige, gradzahlige und Volumenstreuung - aufspaltet. Weiter entwickelte Ansätze finden sich in [35] und [53], in welchen eine Segmentierung des von polarimetrischen Deskriptoren aufgespannten Merkmalraums verwenden, um eine unüberwachte Klassifikation zu erzielen.

Entropie-Alpha Klassifikation

Basierend auf der Eigenzerlegung der Kohärenzmatrix \mathbf{T}_3 und den daraus resultierenden polarimetrischen Parametern H_p und α_p -Winkel wurde in [35] ein einfaches unüberwachtes Klassifikationsschema in 8 Klassen vorgeschlagen. Die Entropie ist ein Maß für die Zufälligkeit des Streuprozesses und kann damit Hinweise auf die Komplexität der Streuer liefern. Im allgemeinen zeigen nur vegetationslose Oberflächen eine niedrige Entropie, hohe Entropie ist ein Zeichen für starke Volumenstreuung von Vegetationsschichten. Der α_p -Winkel hingegen liefert direkt für jeden Eigenwert den dazugehörigen Streumechanismus, wobei die drei α_p -Winkel nicht völlig unabhängig voneinander sind [35]. Es wird daher üblicherweise ein mittlerer α_p -Winkel

$$\bar{\alpha}_p = P_1\alpha_{p1} + P_2\alpha_{p2} + P_3\alpha_{p3} \quad 0^\circ \leq \bar{\alpha}_p \leq 90^\circ \quad (3.15)$$

definiert, welcher alle α_p -Winkel, gemäß der relativen Stärke ihrer Eigenwerte P_i , gewichtet berücksichtigt. Die beiden Parametern H_p und $\bar{\alpha}_p$ spannen einen physikalisch motivierten Merkmalsraum auf, der mittels Schwellwerten in die folgenden Klassen ω_i aufgeteilt wird (vergl. Abb. 3.4):

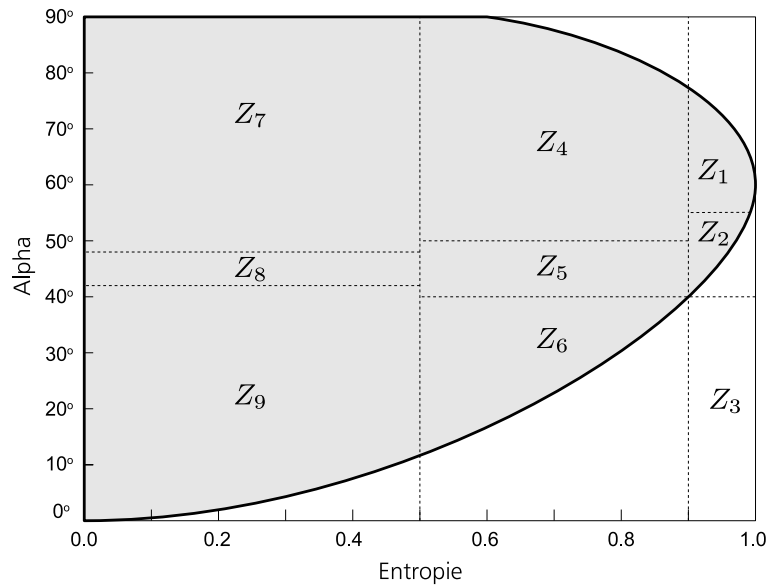


Abbildung 3.4: Merkmalsraum von Entropie und $\bar{\alpha}_p$ mit Schwellwertunterteilung in 9 Klassen. Die Kurve grenzt den mathematisch möglichen Wertebereich ab. Die Klasse Z_3 kann nicht eingenommen werden.

- **Oberflächenstreuung mit niedriger Entropie (Z_9):** Ein niedriger Wert von $\bar{\alpha}_p$ ist typisch für verschiedene Arten von Oberflächenstreuung, die niedrige Entropie zeigt, dass nur ein dominanter Streuprozess aufgetreten ist. Wasser, Meersvereisung sowie sehr glatte Landoberflächen fallen in diese Klasse.
- **Dipolstreuung mit niedriger Entropie (Z_8):** Typisch für die Rückstreuung eines isolierten Dipols, sowie für Vegetation mit stark korreliert angeordneten, anisotrop rückstreuenden Einzelstreuern.
- **Mehrfachstreuung mit niedriger Entropie (Z_7):** Typisch für dominante Mehrfachreflektion, wie sie z.B. bei dihedralen Radarreflektoren oder an Gebäudekanten auftritt.
- **Oberflächenstreuung mit mittlerer Entropie (Z_6):** Oberflächen mit hoher Rauigkeit weisen eine erhöhte Entropie auf; das gleiche gilt, wenn leichte Vegetation zu einem sekundären Streuprozess führt.
- **Vegetation mit mittlerer Entropie (Z_5):** Dipolartige Rückstreuung von Vegetation mit verringerter Korrelation in der Anordnung der Einzelstreuer.
- **Mehrfachstreuung mit mittlerer Entropie (Z_4):** Typisch für Vegetationsflächen, bei denen zusätzlich zur Rückstreuung der Baumkrone signifikante Doppelreflektionen über Stamm/Boden auftreten. Auch dichte urbane Flächen können eine solche Mischung aus Doppel- und Volumenreflektionen aufweisen.
- **Vegetation mit hoher Entropie (Z_2):** Typisch für die Rückstreuung eines Volumens mit zufälliger Anordnung der Einzelstreuer. Verschiedene einzelne α_p -Winkel mitteln sich hier zu 45° . Insbesondere dichte Waldgebiete fallen in diese Klasse.

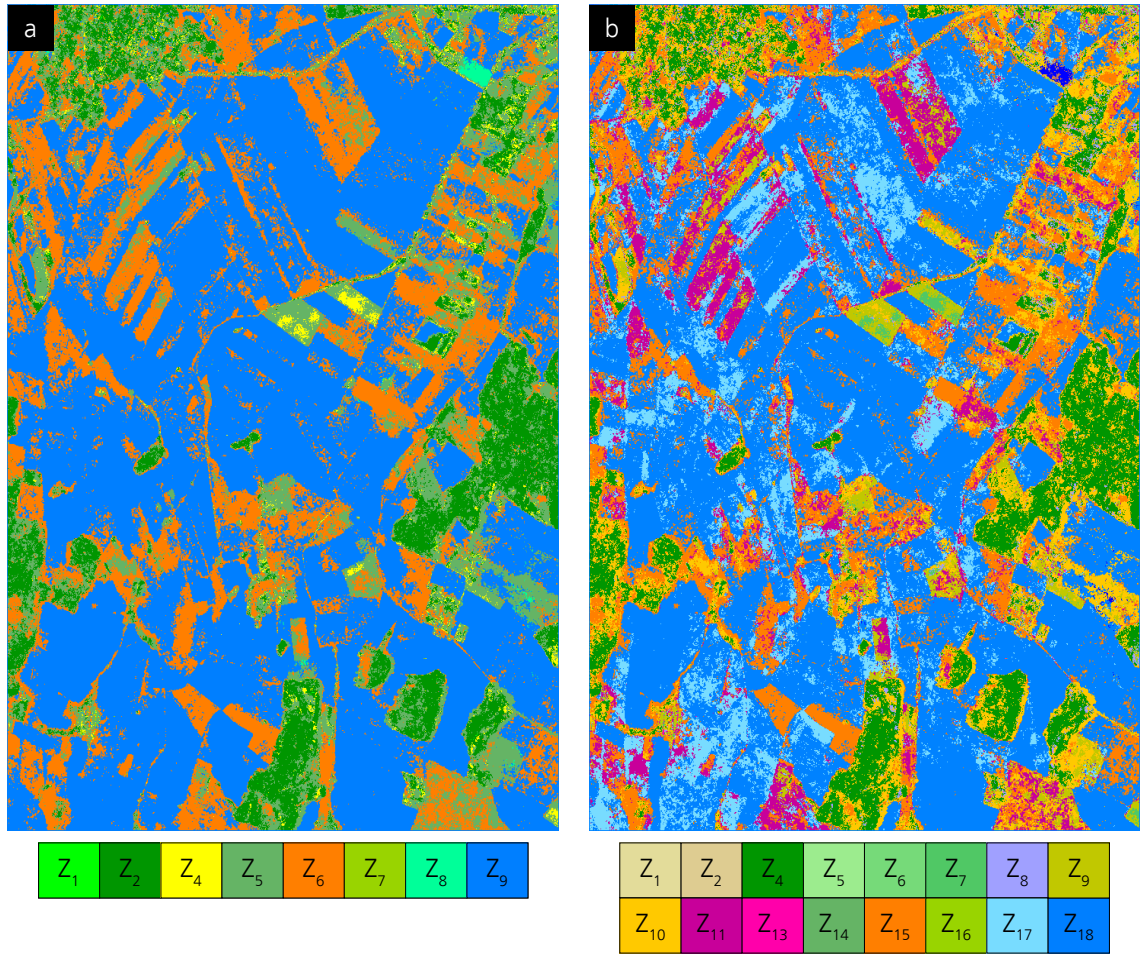


Abbildung 3.5: a) Unüberwachte Klassifikation in 8 Klassen durch Schwellwerteinteilung des Entropie-Alpha Raums. b) Unüberwachte Klassifikation in 16 Klassen durch Schwellwerteinteilung des Entropie-Alpha-Anisotropie Raums. Klasse Z_3 und Z_{12} können nicht auftreten.

- **Mehrfachreflektion mit hoher Entropie (Z_1):** Ist trotz dichter Vegetation noch eine gewisse Doppelreflektionskomponente von Stamm/Boden vorhanden, so fallen die Daten in Klasse Z_1 .

Der Wertebereich der Klasse Z_3 kann aus mathematischen Gründen nicht erreicht werden [35]. Die genaue Lage der Klassengrenzen ist dabei zu einem gewissen Grad beliebig und hängt von der Qualität der Sensorkalibrierung, vom Signal-Rausch Verhältnis und Varianz der Parameter selber ab. Gängige Werte sind in Abb. 3.4 zu finden. Klassifiziert man den Datensatz aus Abb. 3.3 mit dem beschriebenen Entropie-Alpha Algorithmus, so ergibt sich das in Abb 3.5a gezeigte Klassifikationsergebnis.

Eine Erweiterung dieses Konzepts lässt sich durch Berücksichtigung der Anisotropie

$$A_p = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad 0 \leq A_p \leq 1 \quad (3.16)$$

erreichen, welche ein Maß für die relative Stärke sekundärer Streumechanismen darstellt [34][50]. H_p , $\bar{\alpha}_p$ und A_p spannen einen dreidimensionalen Merkmalsraum auf, welcher wiederum mittels Schwellwerten unterteilt werden kann. Benutzt man die gleichen Grenzen wie in Abb. 3.4 und teilt jede der entstehenden Klassen gemäß $A_p \geq 0.5$ und $A_p < 0.5$ in zwei neue auf, so erhält man das Klassifikationsergebnis in Abb. 3.5b. Ganz offensichtlich erlaubt die Anisotropie eine feinere Unterscheidung gewisser Klassen, die in der reinen H_p - $\bar{\alpha}_p$ Klassifizierung noch identisch erscheinen.

Trotz der attraktiven direkten Verbindung zu den physikalischen Rückstreueigenschaften besitzt diese einfache Klassifikation über Schwellwerte aber auch eine Reihe Nachteile. Insbesondere erlaubt die feste Lage der Schwellwerte nicht unbedingt, die tatsächlich in der Szene vorhandenen Streuprozesse sauber zu unterscheiden, bzw. sie den tatsächlichen thematischen Oberflächenklassen zuzuordnen. Des weiteren führt die Projektion vieler homogener Flächen im H_p - $\bar{\alpha}_p$ oder im H_p - A_p - $\bar{\alpha}_p$ Merkmalsraum zu einer statistisch sehr weiten Verteilung. Die festen Klassengrenzen, die keinen Bezug zu den tatsächlichen Schwerpunkten und Weiten dieser Verteilung haben, führen daher ganz automatisch zu einer Fehlklassifikation vieler Pixel.

K-means Wishart Klassifikation

Eine andere Klasse unüberwachter Klassifikationsalgorithmen basiert ausschließlich auf statistischer Gruppierung. Polarimetrische Daten, repräsentiert durch ihre Kovarianz- oder Kohärenzmatrizen³, folgen der komplexen WISHART-Verteilung [77]. Basierend auf dieser Verteilung kann ein statistisches Abstandsmaß abgeleitet werden [111], welches benutzt werden kann, um mit Hilfe von Standardverfahren wie ISODATA [5] die Daten im Merkmalsraum der Kohärenzmatrizen zu segmentieren. Es wird also kein rein physikalisch motivierter Ansatz verfolgt, sondern mit einem statistischen *Maximum-Likelihood* Verfahren, basierend auf der komplexen WISHART-Verteilung der polarimetrischen Kovarianz- oder Kohärenzmatrix, kombiniert.

Mit der mittleren Kohärenzmatrix $\Sigma_i = E(\mathbf{T}|\mathbf{T} \in \omega_i)$ der Klasse ω_i lautet die WISHART-Verteilung der polarimetrischen Kohärenzmatrix [111][113]

$$p(\mathbf{T}|\Sigma_i) = \frac{n^{qn} |\mathbf{T}|^{n-q}}{|\Sigma_i|^{n\pi q(q-1)/2} \prod_{j=1}^q \Gamma(n-j+1)} \exp[-n \text{Spur}(\Sigma_i^{-1} \mathbf{T})] \quad , \quad (3.17)$$

wobei q die Dimensionalität (hier 3), n die zur Bildung von \mathbf{T} verwendeten Looks, $|\dots|$ die Determinantenbildung und $\Gamma(\dots)$ die Gammafunktion bezeichnet. $p(\mathbf{T}|\Sigma_i)$ gibt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Kohärenzmatrizen \mathbf{T} an, die zu einer Klasse ω_i mit einer 'wahren' Kohärenzmatrix Σ_i gehört. Gemäß dem BAYES'schen Theorem [67] wird das betreffende Pixel derjenigen Klasse zugeordnet, für die gilt

$$\mathbf{T} \in \omega_i \quad \text{falls} \quad p(\mathbf{T}|\Sigma_i)p(\Sigma_i) > p(\mathbf{T}|\Sigma_j)p(\Sigma_j) \quad \forall j \neq i \quad . \quad (3.18)$$

$p(\Sigma_i)$ bezeichnen dabei die *a-priori* Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Klasse ω_i , welche im allgemeinen Fall unbekannt sind und daher häufig für alle ω_i als gleich angenommen werden. Üblicher als das Arbeiten mit Wahrscheinlichkeitsdichten ist die Benutzung sogenannter *Diskriminatoren*, welche vereinfachte statistische Distanzmaße darstellen und ähnlich wie in Gl. 3.18

³Da Kovarianz- und Kohärenzmatrix durch lineare Transformationen ineinander übergeführt werden können, ist es für statistische Klassifikationsverfahren unerheblich ob \mathbf{C} oder \mathbf{T} verwendet wird

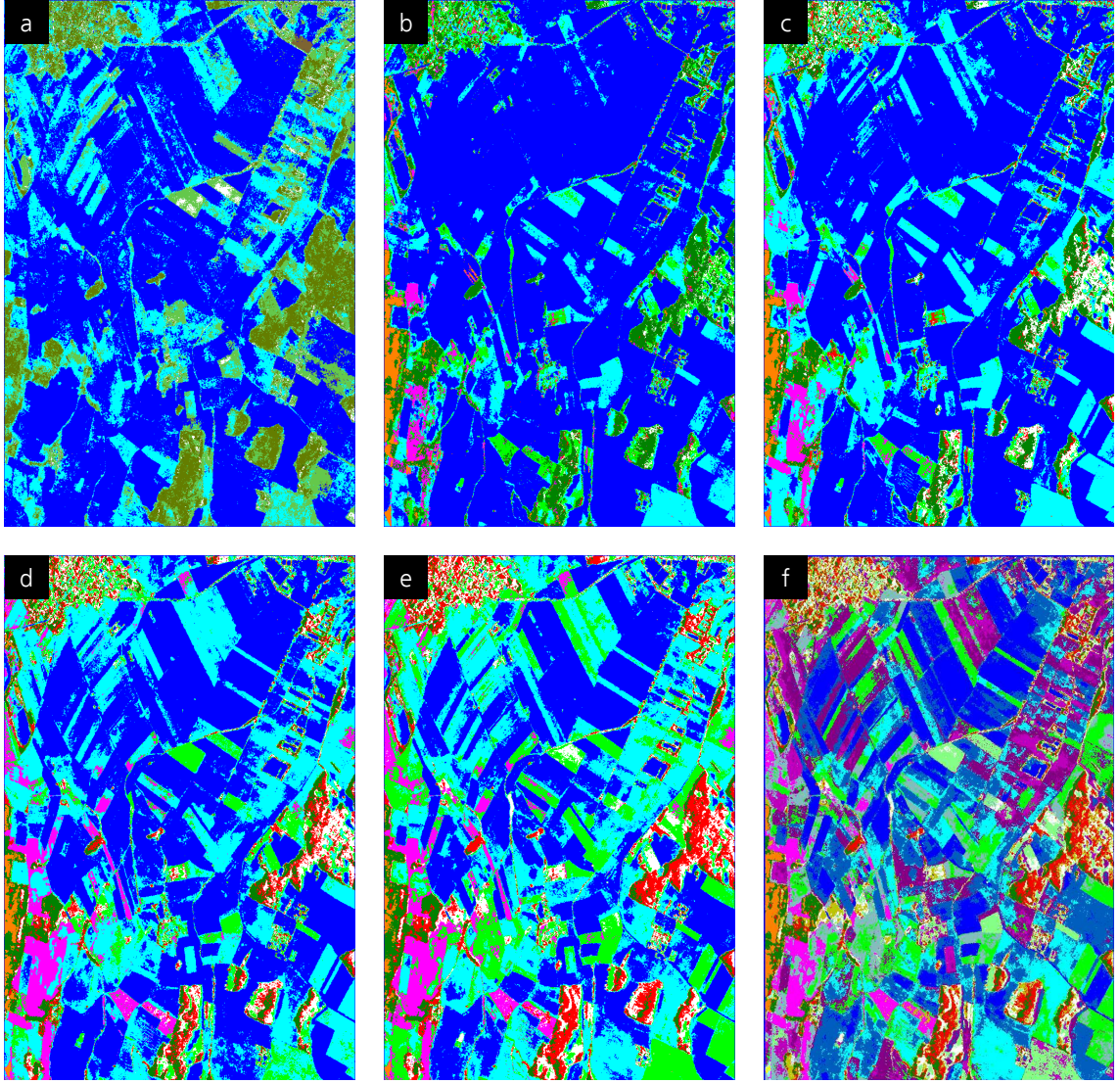


Abbildung 3.6: Unüberwachte WISHART-Klassifikation. a) Initialisierung in 8 Klassen durch unüberwachte H_p - $\bar{\alpha}_p$ Klassifikation. b) Klassifikation nach erster WISHART-Iteration. c) nach zweiter WISHART-Iteration. d) nach 5 WISHART-Iterationen. e) nach 10 WISHART-Iterationen. f) Unüberwachte WISHART-Klassifikation in 16 Klassen durch Zuhilfenahme der Anisotropie (10 Iterationen) [53]

zur Entscheidung verwendet werden können. Ein geeigneter aus der WISHART-Verteilung abgeleiteter Diskriminator ist [111][110]

$$d(\mathbf{T}|\boldsymbol{\Sigma}_i) = \ln |\boldsymbol{\Sigma}_i| + \text{Spur}(\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}\mathbf{T}) \quad . \quad (3.19)$$

Dieses äquivalente Distanzmaß nimmt gleiche *a-priori* Wahrscheinlichkeiten $p(\boldsymbol{\Sigma}_i)$ an und ist unabhängig von der Anzahl Looks, sodass es problemlos für die Klassifikation von vorgefilterten polarimetrischen Daten verwendet werden kann. Das Entscheidungskriterium lautet analog zu Gl. 3.18

$$\mathbf{T} \in \omega_i \quad \text{falls} \quad d(\mathbf{T}|\boldsymbol{\Sigma}_i) < d(\mathbf{T}|\boldsymbol{\Sigma}_j) \quad \forall j \neq i \quad . \quad (3.20)$$

Mit der beschriebenen Maximum-Likelihood Klassifizierung ist es also möglich, unklassifizierte Pixel einer Klasse mit der 'wahren' Kohärenzmatrix Σ_i zuzuordnen. Es verbleibt aber die Frage wie man geeignete Σ_i bestimmen kann. In überwachten Klassifikationen geschieht dies durch Mittelung der Kohärenzmatrizen über die ausgewählten Trainingsgebiete. In einer unüberwachten Klassifikation kann diese Initialisierung stattdessen mit Hilfe der zuvor beschriebenen physikalischen $H_p\text{-}\bar{\alpha}_p$ Klassifikation vorgenommen werden [110]. Dazu wird für jede der 8 Zonen aus Abb. 3.4 eine mittlere Kohärenzmatrix berechnet:

$$\Sigma_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j \in \omega_i} \mathbf{T}_j \quad \text{mit} \quad N_i = \text{Anzahl Pixel in } \omega_i \quad . \quad (3.21)$$

Nachdem so die acht initialen Σ_i bestimmt worden sind, werden alle Pixel des Bildes einem dieser Klassenzentren zugeordnet. Anschließend aktualisiert man gemäß Gl. 3.21 die Klassenzentren und nimmt wiederum eine Zuordnung aller Pixel vor. Dieser Vorgang wird iterativ solange wiederholt bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Dies kann ein Prozentsatz von Pixeln, der von einer Iteration zur nächsten die Klasse wechselt, eine gegebene Anzahl von Iteration, oder eine Kombination aus beidem sein. Beispiele für Klassifikationsergebnisse, ausgehend von den Vorklassifikationen aus Abb. 3.5, sind in Abb. 3.6 gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen wie durch fortschreitende WISHART-Iterationen eine homogenere Klassifikation erzielt wird und sich besser abgegrenzte Klassen herausbilden. Weitere Verbesserungen des beschriebenen Klassifikationsschemas finden sich z.B. in [53], indem durch Einbeziehung der Anisotropie und leichten Veränderungen an der Iterationstaktik eine höhere Klassifikationsqualität erzielt wird, oder in [112], indem Klassenzuordnungen vermieden werden, die dem jeweiligen dominanten polarimetrischen Streumechanismus des Pixels widersprechen.

Der Vorteil in dieser Vorgehensweise liegt darin, dass die festen, relativ beliebig definierten Klassengrenzen der $H_p\text{-}\bar{\alpha}_p$ Klassifikation vermieden werden. Stattdessen wird mit beweglichen Klassenzentren Σ_i gearbeitet, die sich über mehrere Iterationen sinnvollen Orten im Merkmalsraum annähern. Das beschriebene Verfahren ähnelt sehr stark der bekannten *k-means* Klassifikationsmethode [176], mit dem Unterschied, dass hier die Initialisierung basierend auf einer sinnvollen physikalisch motivierten Vorklassifikation geschieht. Ein Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass eine direkte physikalische Interpretation des Ergebnisses, wie bei der $H_p\text{-}\bar{\alpha}_p$ Klassifikation, nicht mehr möglich ist. Durch das Wandern der Klassenzentren während der Iterationen entstehen Klassen, die nicht mehr den physikalisch motivierten Segmenten in der $H_p\text{-}\bar{\alpha}_p$ Ebene zugeordnet werden können. Trotzdem ist es aber möglich, aus den resultierenden Σ_i die dazugehörigen Entropien und Alphaswinkel zu bestimmen, um so zumindest Hinweise auf die Art der Klassen zu erhalten.

3.2 Anisotrope polarimetrische Rückstreuung

Wie in Kapitel 2 erläutert wird ein Objekt während der Azimutintegration von dem SAR Sensor aus verschiedenen Richtungen, also mit verschiedenen Squintwinkeln, betrachtet. Komplexe Strukturen mit anisotropem geometrischen Aufbau zeigen meist eine winkelabhängige Rückstreuung, eine Tatsache, die in dem linearen Ansatz des 'radiating reflector' Modells nicht berücksichtigt wird. Tatsächlich führt anisotrope Rückstreuung nur selten zu Fokussierungsproblemen, wohl aber zu Fehlern bei der polarimetrischen Parameterschätzung und bei Klassifizierungen. Problematisch sind insbesondere periodische Strukturen, wie sie oft auf landwirtschaftlichen Flächen vorkommen, sowie nahe beieinanderliegende starke Streuer. In neuerer Zeit

wurde die Analyse anisotroper Rückstreuung auch als Informationsquelle genutzt. So werden beispielsweise in [60] und [180] für den monopolen Fall die azimutale Rückstreuvariationen mit Hidden-Markov Modellen beschrieben. Souyris *et al.* [191] verwendet Subaperturen in Azimut und Entfernung, um künstliche Streuer von natürlichen Oberflächen zu unterscheiden. In [185] wird dieses Konzept auf den polarimetrischen Fall generalisiert und zur Identifikation kohärenter Streuer, d.h. Streuer mit stabiler Rückstreuamplitude, in urbanen Gegenden verwendet. In [52] hingegen wird das anisotrope Rückstreuverhalten bestimmter landwirtschaftlicher Oberflächen genutzt, um deren Oberflächenstruktur zu beschreiben. Schließlich lassen sich auch in der polarimetrischen Interferometrie Einflüsse anisotroper Rückstreuung beobachten [55][52].

3.2.1 Azimutale Variationen der polarimetrischen Rückstreuung

Während der SAR Datenaufzeichnung werden viele niedrigauflösende Echos eines Ziels unter verschiedenen Squintwinkeln registriert, welche anschließend während der Prozessierung zu dem hochauflösenden Bildergebnis integriert werden. Ein einzelnes Bildpixel enthält daher nicht nur Signalanteile in der mittleren Blickrichtung sondern auch die des gesamten von der Antenne erfassten Winkelbereichs. Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, lassen sich auch fokussierte Daten in einzelne Azimut-Subaperturen aufspalten, welche jeweils nur einen kleinen Teil des gesamten Winkelbereichs beinhalten. Wie auch aus dem vollaufgelösten Bildergebnis lässt sich aus jeder dieser Subaperturen ein mittlerer Alphawinkel $\bar{\alpha}$ und eine Entropie H_p bestimmen [54]. Abb. 3.7 zeigt das Ergebnis einer solchen polarimetrischen Parameterbestimmung auf einzelnen Subaperturen am Beispiel einer landwirtschaftlichen Feldfläche. Es lässt sich insbesondere erkennen, dass mit der Änderung des Blickwinkels auch starke Variationen in den polarimetrischen Parametern einhergehen. Immer dann, wenn die Spur der Streumatrix ein Maximum erreicht, scheinen sowohl $\bar{\alpha}$ als auch H_p ein Minimum zu erreichen. Versucht man, wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, solche Flächen mit Hilfe physikalischer oder statistischer Verfahren zu klassifizieren, kommt es zu Fehlinterpretationen, die zudem von der spezifischen Ausrichtung der Flächen zu der Flugbahn des Sensors abhängig sind [56].

Viele weitere Objekte zeigen solche anisotrope polarimetrische Signaturen; insbesondere Kanten von Gebäuden, lineare Strukturen und manche punktförmige Streuer sind zu erwähnen. Generell besitzen anisotrope Streuer meist unregelmäßige Formen oder Flächen, die zu gerichteten Spiegelungen führen. Beides kann zu starken Variationen im auftretenden Streumechanismus sowie in der gesamten zurückgestreuten Leistung führen. Es ist anzumerken, dass Waldgebiete im allgemeinen keine anisotrope Rückstreuung zeigen. Ihre Reflektion ist dominiert von Volumenstreuung, d.h. von der Reflektion zufällig angeordneter anisotrop streuender Einzelelemente (z.B. Dipole). Die kohärente Überlagerung dieser Einzelstreuer ergibt eine Antwort von hoher Intensität, geringem Polarisationsgrad und hoher Isotropie.

In Abb. 3.7 weisen die zu beobachtenden hellen Streifen im Spurbild darauf hin, dass es zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen der kohärenten Strahlung gekommen ist. Dies ist charakteristisch für sogenannte BRAGG-Resonanzen auf periodischen oder quasiperiodischen Oberflächen [203][35][218]. Eine solche Oberfläche $S(x, y)$, skizziert in Abb. 3.8a, kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$S(x, y) = D \cos\left(\frac{2\pi}{P}y\right) + \Xi(x, y) \quad , \quad (3.22)$$

wobei D und P die Amplitude und Wellenlänge der periodischen Komponente von $S(x, y)$ be-

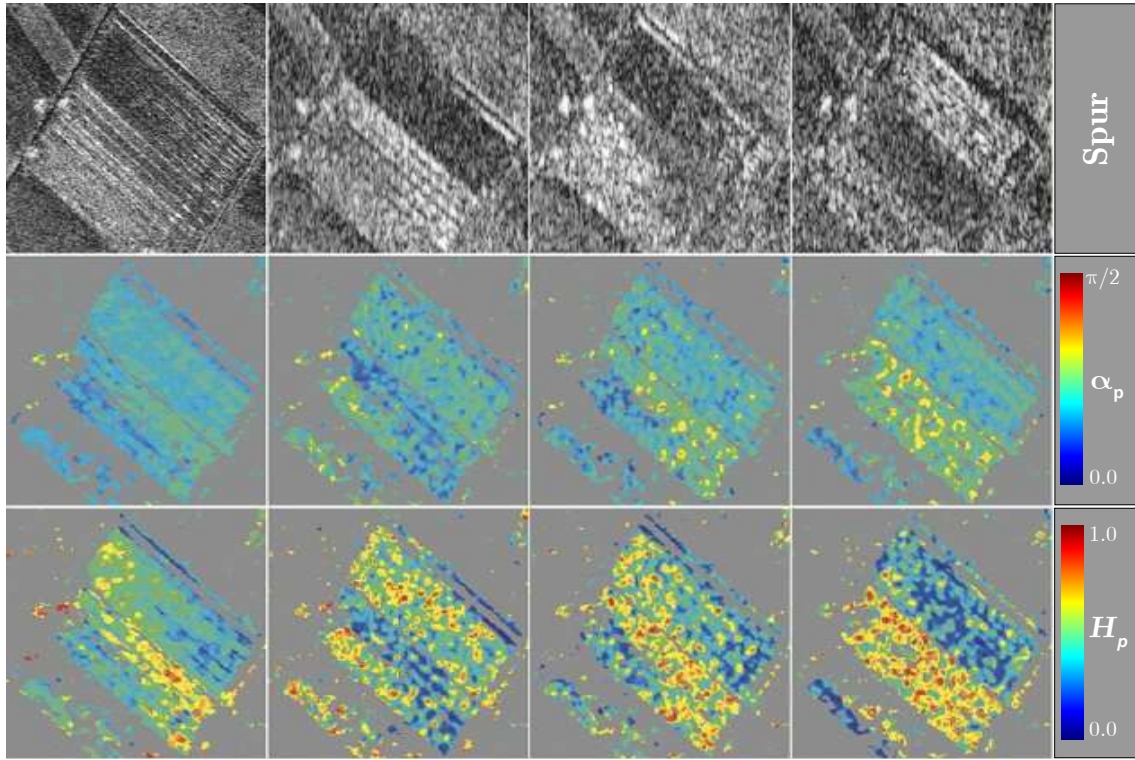


Abbildung 3.7: Verschiedene Aufnahmen einer landwirtschaftlichen Fläche. Oben: Spurbild. Mitte: Alpha-Winkel. Unten: Polarimetrische Entropie. Links: Volle Auflösung. Rechts: 3 verschiedene Subaperturaufnahmen bei den Squintwinkeln -3.5° , 0.0° und $+3.5^\circ$.

schreiben. $\Xi(x, y)$ entspricht als Störungsterm einer isotropen zufälligen rauen Oberfläche. Die Resonanzbedingung der BRAGG-Streuung kann als Funktion der Wellenlänge λ ausgedrückt werden

$$2k_y = m \frac{2\pi}{P} \quad \Rightarrow \quad \sin \theta \cos \varphi = m \frac{\lambda}{2P} \quad , \quad (3.23)$$

wobei k_y der Projektion der Wellenzahl des Radars in horizontaler Richtung, θ dem lokalen Einfallswinkel, φ dem Winkel zwischen der Beobachtungsrichtung und der Normalen der periodischen Struktur und m der Ordnung der Resonanz entspricht. Im Fall von SAR Messungen lässt sich der Winkel φ über eine Subaperturerlegung der Aufnahmen im Bereich des gesamten Öffnungswinkels der Antenne variieren.

Für gleichartige anisotrope Strukturen mit verschiedenen Entfernungen zum Sensor, d.h. mit verschiedenen Einfallswinkeln, bzw. für Strukturen in verschiedenen Orientierungen zum Sensor, kann die Resonanzbedingung aus Gl. 3.23 in unterschiedlichen Subaperturen erfüllt sein. Es kann auch zu gar keiner Resonanz kommen, wenn die Resonanzbedingung für den gesamten von der Antenne abgedeckten Winkelbereich nicht erfüllt wird. Des weiteren können manche Felder auch Teile haben, welche aufgrund der gemeinsamen Abhängigkeit der Resonanzbedingung von θ und φ in verschiedenen Subaperturen in Resonanz geraten. Dieses Phänomen ist in Abb. 3.8b illustriert, in der die Position der Resonanz in Abhängigkeit von Einfalls- und Blickwinkel abgebildet ist: Mit Variation des azimuthalen Blickwinkels ändert sich der Einfallswinkel für den

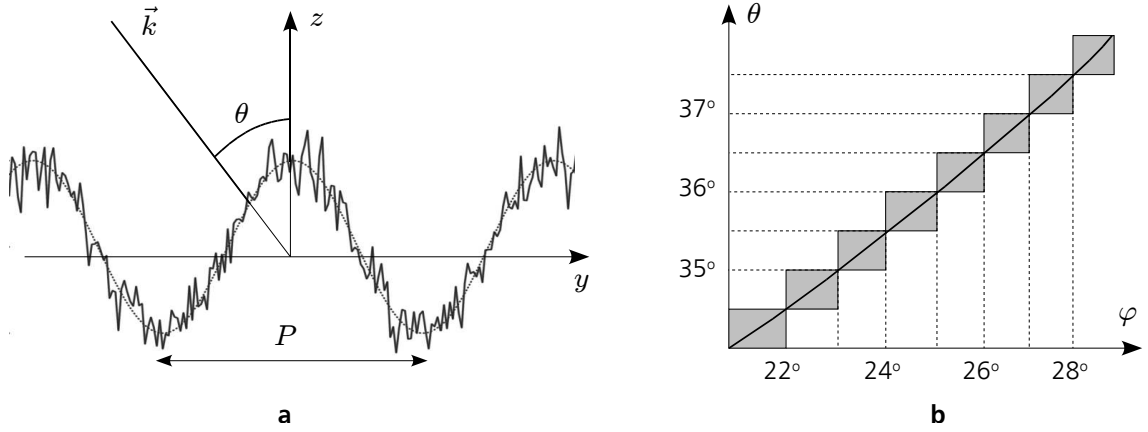


Abbildung 3.8: a) Beispiel einer periodischen Oberfläche mit zufälligen Störungen. b) Position von Resonanzen in der (θ, φ) -Ebene.

Gl. 3.23 erfüllt ist, was zu einem mit der Lage der Subapertur über das Feld gleitenden Bereich der Resonanz führt, dessen Breite durch die Bandbreite der Subaperturen festgelegt wird. Dieser Effekt lässt sich auch in Abb. 3.7 beobachten, wo ein schmaler Streifen hoher Rückstreuintensität (Span) über das Bild gleitet und entsprechend zu durch BRAGG-Resonanzen veränderten H_p und $\bar{\alpha}_p$ Werten führt. Ein solches Verhalten wird auch von Simulationen quasiperiodischer Oberflächen, basierend auf den Ansätzen in [218], gestützt: Im Fall von BRAGG-Resonanz kommt es zu nahezu identischen Rückstreckoeffizienten in HH und VV, was sehr niedrige H_p und $\bar{\alpha}_p$ Werte verursacht. Außerhalb der Resonanz nehmen beide Parameter hingegen ihre 'normalen' Werte an [58][49].

3.2.2 Maximum-Likelihood Detektion nicht-stationärer Objekte

Über eine statistische Analyse der polarimetrischen Signaturen unter verschiedenen Squintwinkeln ist es möglich, Objekte mit potentiell nicht-stationärer Rückstreuung zu detektieren. Diese Detektion, sowie die Bestimmung der jeweiligen Subaperturen in Resonanz, kann über die Evaluierung der Statistiken von Maximum-Likelihood Verhältnissen erreicht werden [51][57][58].

Wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert, folgt unter der Annahme einer multivarianten komplexen GAUSS-Verteilung der Streuvektoren \vec{k}_3 die Kohärenzmatrix $\mathbf{T} = E(\vec{k}_3 \vec{k}_3^\dagger)$ der WISHART-Wahrscheinlichkeitsverteilung aus Gl. 3.17. Dies gilt für die polarimetrische SAR Aufnahme in voller Aufnahme gleichermaßen wie für jede einzelne Subaperturaufnahme. Im Fall einer in R Subaperturen zerlegten Aufnahme ist also jedes Bildpixel mit einem Satz von R WISHART-verteilten Kohärenzmatrizen assoziiert. Das Pixel besitzt genau dann ein stationäres Rückstreuverhalten, wenn seine R Kohärenzmatrizen \mathbf{T}_i zu derselben Verteilung gehören. In diesem Fall wird die folgende Hypothese erfüllt:

$$\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_2 = \dots = \mathbf{T}_R \quad . \quad (3.24)$$

Die Gültigkeit dieser Hypothese kann mit Hilfe des Maximum-Likelihood Verhältnisses Λ , welches aus den Kohärenzmatrizen der Subaperturerlegung gebildet wird, überprüft werden [136]

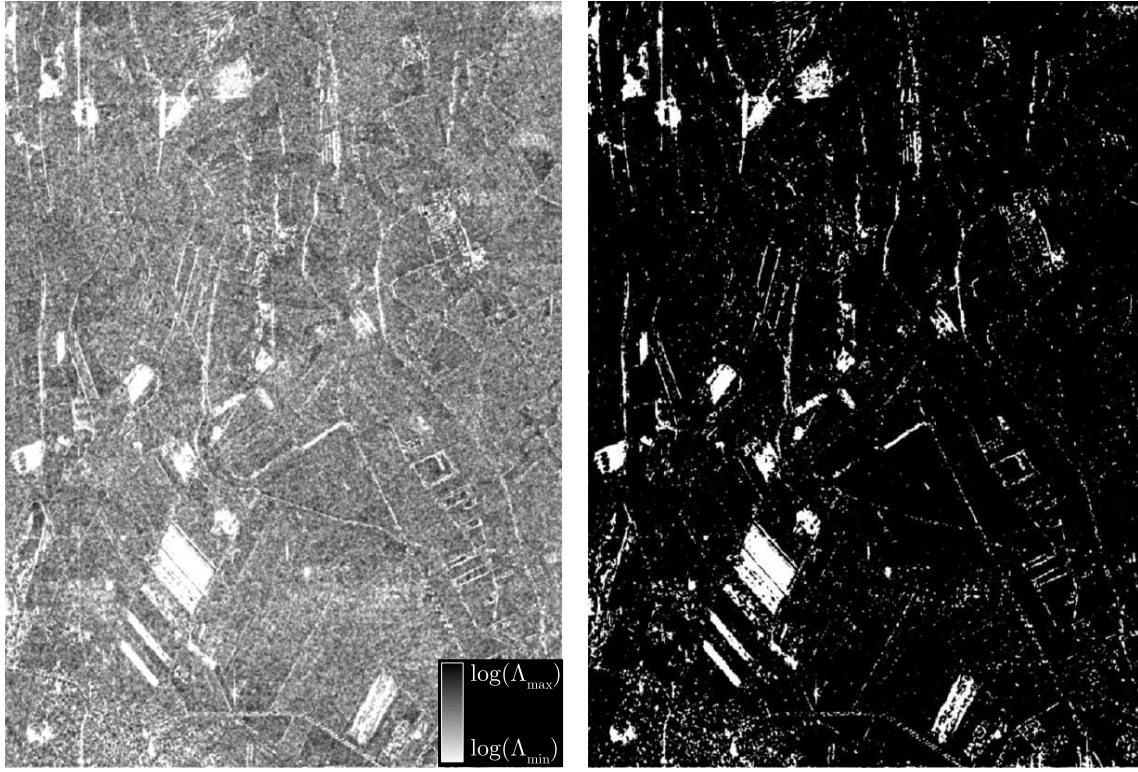


Abbildung 3.9: Links: Logarithmus des Maximum-Likelihood Verhältnisses. Rechts: Karte der nicht-stationären Pixel, hier dargestellt in weiß.

$$\Lambda = \frac{\prod_{i=1}^R |\mathbf{T}_i|^{n_i}}{|\mathbf{T}_t|^{n_t}} \quad \text{mit} \quad n_t = \sum_{i=1}^R n_i, \quad \mathbf{T}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^R n_i \mathbf{T}_i, \quad (3.25)$$

wobei n_i die Anzahl an Streuvektoren bezeichnet, die zur Berechnung der Kohärenzmatrix \mathbf{T}_i verwendet wurden. Der Wert von Λ liegt dabei zwischen 0.0 (sehr verschiedene \mathbf{T}_i) und 1.0 (alle \mathbf{T}_i identisch). Die Hypothese wird akzeptiert und damit das Objekt als isotrop streuend angenommen, wenn eine beliebig wählbare Fehlalarmrate P_{fa} unterschritten wird. Das bedeutet

$$\Lambda < c_\beta \quad \text{mit} \quad P_{fa}(c_\beta) = P(\Lambda \leq c_\beta) = \beta, \quad (3.26)$$

Das Vorgehen in Gl. 3.26 erfordert die Bestimmung von $P_{fa}(c_\beta)$ unter der Annahme der Stationarität wie in Gl. 3.24. Ein analytischer Ausdruck lässt sich aus der Bestimmung der Momente des Maximum-Likelihood Verhältnisses ableiten. Nach einigen Entwicklungen und Vereinfachungen, ausgeführt in [58], erhält man folgenden Näherungsausdruck für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fehlalarmrate:

$$P_{fa}(c_\beta) = 1 - \Gamma_{inc}(f/2, -\rho \log c_\beta) - \omega_2(\Gamma_{inc}(f/2 + 2, -\rho \log c_\beta) - \Gamma_{inc}(f/2, -\rho \log c_\beta)) \quad , \quad (3.27)$$

wobei $\Gamma_{inc}(a, b)$ die unvollständige Gammafunktion des Grades a von dem Wert b bezeichnet. Die Bedeutung von f , ρ und ω_2 , welche alle unabhängig von c_β sind, werden im Detail in [58]

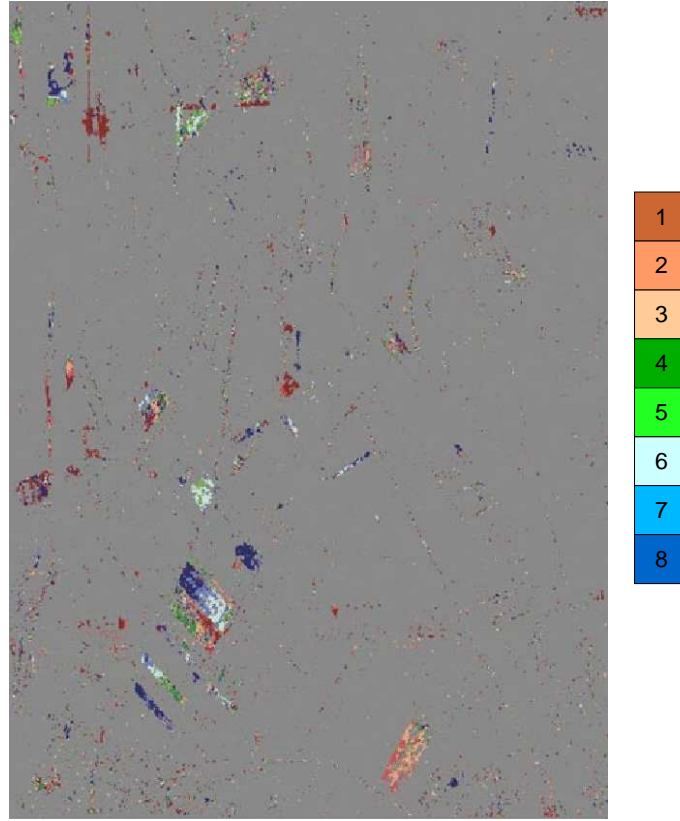


Abbildung 3.10: Nummer der Subapertur mit der geringsten Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zur Statistik der 8 ursprünglichen Subaperturen. Stationäre Pixel sind in grau dargestellt.

erläutert. Beispiele für die beschriebene Detektionsmethode sind in Abb. 3.9 dargestellt: Links ist der Logarithmus des Maximum-Likelihood Verhältnisses abgebildet, in dem sich anisotrope Streuer hell abzeichnen (Λ nahe Null), rechts die Detektion mit einem geeigneten Schwellwert.

Ein ähnlicher Ansatz kann zur Lokalisierung von Subaperturen mit anisotropem Rückstreuverhalten verfolgt werden. Ein Pixel, welches anisotrope Rückstreuung aufweist, besitzt einen Satz von Kohärenzmatrizen, welche die Hypothese aus Gl. 3.24 nicht erfüllen, d.h. mindestens eine der R Matrizen gehört nicht zu der globalen Statistik dieses Pixels. Berechnet man also das Maximum-Likelihood Verhältnis gemäß Gl. 3.25 ohne Berücksichtigung der betreffenden Matrix, so ergibt sich ein höherer Wert von Λ als bei Einbeziehung aller Subaperturen. Für jedes Pixel des Bildes sucht man also die Subapertur sub_i mit $i \in [1, \dots, R]$, welche am wenigsten zu der globalen Statistik dieses Pixels passt, welche also die Bedingung

$$\text{sub}_i = \arg\max \Omega_{R-1}(\text{sub}_i) \quad (3.28)$$

erfüllt, wobei $\Omega_{R-1}(\text{sub}_i)$ das Maximum-Likelihood Verhältnis ohne Verwendung von Subapertur sub_i darstellt. Es ist definiert als

$$\Omega_{R-1}(\text{sub}_i) = \frac{\prod_{i=1, i \neq j}^R |\mathbf{T}_i|^{n_i}}{|\mathbf{T}_t|^{n_t}} \quad \text{mit} \quad n_t = \sum_{i=1, i \neq j}^R n_i, \quad \mathbf{T}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1, i \neq j}^R n_i \mathbf{T}_i. \quad (3.29)$$

Auf diese Weise kann für jedes Pixel aus einem ursprünglichem Satz von R Subaperturen iterativ diejenigen Subaperturen mit nicht-stationärem Verhalten bestimmt werden. Ein Detektionsalgorithmus kann z.B. folgendermaßen aufgebaut sein:

Schritt 1: Test der Stationarität gemäß Gl. 3.26 auf allen R Subaperturen.

Wenn $\Lambda > c_\beta$: Das Pixel verhält sich stationär \Rightarrow stop

Schritt 2: Suche nach der unstationärsten Subapertur sub_i gemäß Gl. 3.28.

Entfernen dieser Subapertur aus der Liste der verfügbaren Subaperturen.

Schritt 3: Test der Stationarität gemäß Gl. 3.26 auf den verbliebenen Subaperturen.

Wenn $\Lambda > c_{\beta_{nsub}}$: Das Pixel verhält sich nun stationär \Rightarrow stop

Falls nicht, und falls kein weiteres Abbruchkriterium erfüllt ist \Rightarrow Schritt 2

Der beschriebene Algorithmus registriert Schritt für Schritt die Subaperturen, die nicht zu der globalen Statistik des betreffenden Pixels passen. Die Iterationen enden, wenn sich die verbliebenen Subaperturen stationär verhalten oder wenn ein Abbruchkriterium, wie z.B. eine gewünschte Mindestanzahl von Subaperturen, erfüllt wird. Der Wert $c_{\beta_{nsub}}$ kann eventuell unterschiedlich von c_β und abhängig von der verbliebenen Anzahl von Subaperturen gewählt werden, um eine gewünschte Empfindlichkeit der Detektion einzustellen.

Ein Beispiel für die Bestimmung der anisotropen Subaperturen ist in Abb. 3.10 gezeigt. Für jedes als anisotrop detektierte Pixel (Gl. 3.26) ist hier eine Farbmarkierung angebracht worden, welche die Nummer der jeweils am wenigsten zur globalen Statistik des Pixels gehörende Subapertur kennzeichnet. An machen Feldern ist gut zu erkennen wie der Effekt der BRAGG-Resonanz mit Variation des Blickwinkels über das Objekt gleitet (vergleiche Abb. 3.8).

3.2.3 Korrektur nicht-stationärer Rückstreuung

Sobald die Pixel mit anisotropen Verhalten und die jeweiligen problematischen Subaperturen bekannt sind, kann versucht werden, die polarimetrischen Signaturen von Störbeiträgen zu reinigen und so eine verbesserte Bestimmung polarimetrischer Parameter zu erreichen. Resonanzen haben meist nur eine kleine Bandbreite, d.h. sie wirken sich nur in einer oder wenigen der Subaperturen aus. Von den verbliebenen, ungestörten Subaperturen kann ein korrigiertes Bild in voller Auflösung integriert werden, wofür es mehrere Methoden gibt. Die einfachste wäre, die unerwünschten spektralen Anteile durch einen Notchfilter auszublenden. Dies würde aber durch die entstehende uneinheitliche spektrale Hüllkurve zu relativ schlechter Bildauflösung in den betroffenen Bereichen führen.

Ein besserer Weg besteht in der Anpassung der Amplituden der unstationären Subaperturen an die mittlere Amplitude der ungestörten Subaperturen. Typischerweise entsteht bei BRAGG-Resonanzen eine sehr hohe Rückstreuamplitude, die sich trotz Auftretens in nur einer oder wenigen Subaperturen überproportional stark auf die Gesamtückstreuung auswirkt. Die Streumatrix \mathbf{S}_{sub_i} eines Pixels in seiner i -ten Subapertur sub_i kann als

$$\mathbf{S}_{sub_i} = A_i \exp(i\phi_i) \cdot \mathbf{S}_{rel_i} \quad (3.30)$$

ausgedrückt werden, wobei A_i die Wurzel der Spur von \mathbf{S}_{sub_i} und ϕ_i seine absolute Phase bezeichnet. \mathbf{S}_{rel_i} stellt dann eine relative Streumatrix mit normalisierter Leistung dar. Die Ausgleichung

der Streuamplituden geschieht nun durch Ersetzen der Amplituden A_k , die zu unstationären Subaperturen eines Pixels gehören, durch die Schätzung

$$\tilde{A}_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N A_i^2} \quad , \quad (3.31)$$

wobei die Summe über die N verbliebenen stationären Subaperturen des Pixels gebildet wird. Dieses Vorgehen korrigiert die gestörten Amplituden, lässt aber die möglicherweise ebenfalls fehlerhaften polarimetrischen Phasen der Streumatrix unberührt. Durch die nun nicht mehr überproportionale Gewichtung der betreffenden Subaperturen wirken sich der durch BRAGG-Resonanzen hervorgerufene Fehler bereits weniger stark aus als in den ursprünglichen Daten. Es sollte dabei erwähnt werden, dass das resultierende Bildergebnis trotz Filterung sogar eine höhere Auflösung als das Originalbild aufweisen kann, da nun eine gleichförmigere Gewichtung zwischen den Subaperturen vorliegt.

Um auch die polarimetrischen Phasen zu korrigieren, wird zuerst eine stationäre Kohärenzmatrix

$$\tilde{\mathbf{T}}_k = \frac{1}{N} \sum_N \mathbf{T}_i \quad (3.32)$$

konstruiert, wobei \mathbf{T}_i aus den Streumatrizen der stationären Subaperturen gebildet wird. Aus den mittleren Streuparametern von $\tilde{\mathbf{T}}_k$ kann nun ein dazugehöriger unitärer Streuvektor \tilde{k}_k geschätzt werden [34],[35]. Im Anschluss kann aus diesem stationären Streuvektor eine stationäre relative Streumatrix $\tilde{\mathbf{S}}_{rel_k}$ abgeleitet werden

$$\begin{aligned} \tilde{k}_k &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\tilde{S}_{HH} + \tilde{S}_{VV}, \tilde{S}_{HH} - \tilde{S}_{VV}, 2\tilde{S}_{HV}]^T \\ \Rightarrow \tilde{\mathbf{S}}_{rel_k} &= \begin{bmatrix} \tilde{S}_{HH} & \tilde{S}_{HV} \\ \tilde{S}_{HV}^* & \tilde{S}_{VV} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Schließlich rekonstruiert man eine stationäre Streumatrix $\tilde{\mathbf{S}}_{sub_k}$ gemäß Gl. 3.30 aus den geschätzten Amplituden \tilde{A}_k und den relativen Matrizen $\tilde{\mathbf{S}}_{rel_k}$:

$$\mathbf{S}_{sub_k} = A_k \exp(i\phi_k) \cdot \mathbf{S}_{rel_k} \quad (3.34)$$

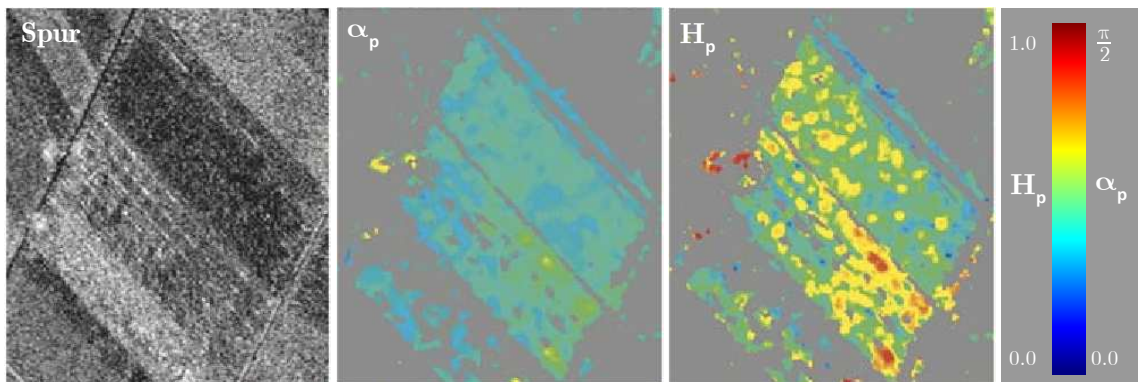


Abbildung 3.11: Polarimetrische Parameter eines einzelnen landwirtschaftlichen Feldes in voller Auflösung, nach Eliminierung anisotroper Subaperturen.

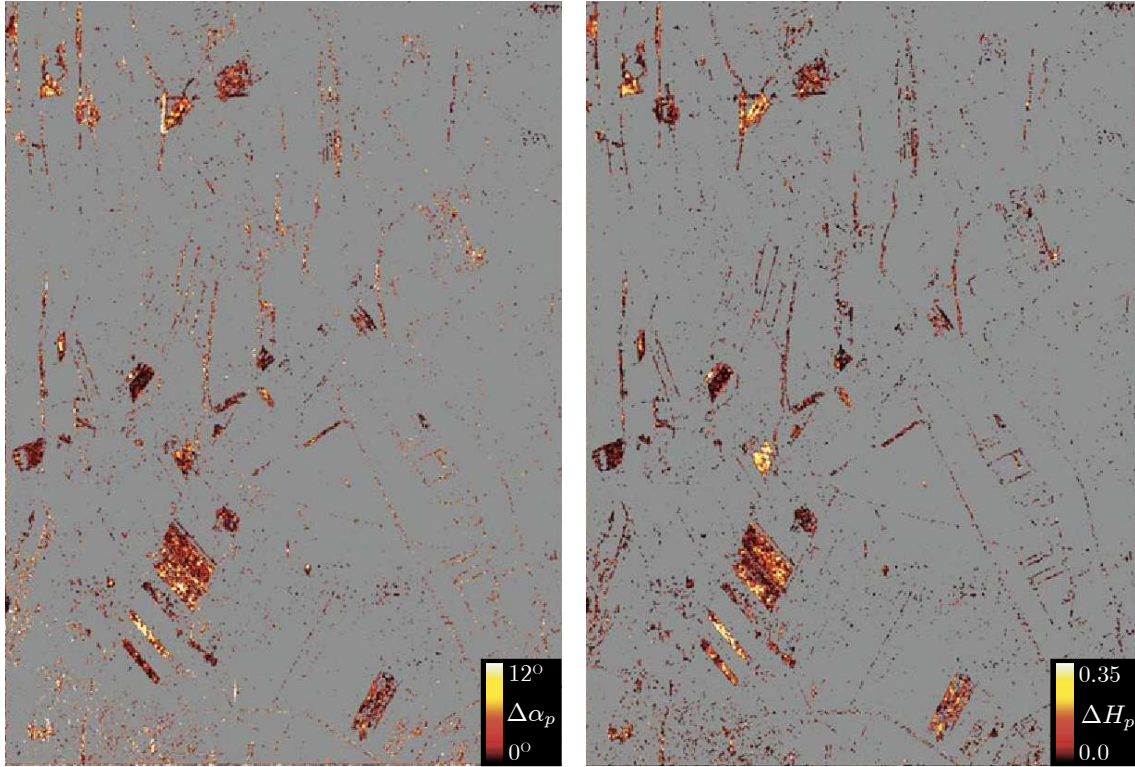


Abbildung 3.12: Nummer der Subapertur mit der geringsten Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zur Statistik der 8 ursprünglichen Subaperturen. Stationäre Pixel sind in grau dargestellt.

Nachdem alle unstationären Subaperturen gemäß Gl. 3.34 korrigiert worden sind, lässt sich durch Rekombination aller Subaperturen eine stationäre Streumatrix in voller Auflösung rekonstruieren. Ein solches Ergebnis ist in Abb. 3.11 gezeigt. Die starken Resonanzeffekte, wie sie in Abb. 3.7 zu beobachten waren, sind nicht mehr vorhanden. Die Bildauflösung und -qualität ist vergleichbar mit der ursprünglichen, d.h. durch die Filterung ist es zu keiner signifikanten Degradation gekommen. Wie zu erwarten zeigen sich gewisse Unterschiede in den resultierenden H_p und $\bar{\alpha}_p$ Parametern; beide nehmen insgesamt höherer Werte an, da BRAGG-Resonanzen mit ihren assoziierten niedrigen H_p und $\bar{\alpha}_p$ Werten weitgehend eliminiert worden sind. Abb. 3.12 zeigt die durch die Filterung hervorgerufenen Änderungen in den H_p und $\bar{\alpha}_p$ Werten über die ganze Szene. Auf einzelnen unstationären Punktstreuern wurden maximale Variation von bis zu $\Delta H_p = 0.8$ und $\Delta \bar{\alpha}_p = 70^\circ$ beobachtet. Im Mittel änderte sich auf unstationären Flächen die Entropie um 0,2 und der Alphawinkel um 7° , beides signifikante Änderungen in Relation zum Wertebereich der beiden Parameter. Für die präzise Extraktion biophysikalischer Parameter aus polarimetrischen SAR Daten ist daher eine vorausgehende Filterung anisotropen Streuverhalten sehr wichtig.

3.3 Nachbarschaftsgestützte polarimetrische Klassifikation

Ein Problem aller der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Klassifikationsverfahren ist, dass jedes einzelne Bildpixel einzeln und unabhängig von seinen Nachbarn betrachtet wird; räumlicher Kontext wird nur indirekt während der Specklefilterung der Kohärenzmatrizen berücksichtigt. Typischerweise lässt die lokale Umgebung eines Pixels durchaus Rückschlüsse auf seine Klassenzugehörigkeit zu. Ist eine Region bereits sehr sicher einer bestimmten Klasse zugeordnet, so ist es unwahrscheinlich, dass ein einzelnes Pixel im Innern der Region einer anderen Klasse zugehörig ist. Wesentlich wahrscheinlicher ist in einem solchen Fall, dass bei diesem Pixel eine Fehlklassifikation aufgetreten ist. Insbesondere SAR Daten weisen durch den Speckleeffekt prinzipiell ein hohes Rauschniveau auf. Unabhängig vom verwendeten Algorithmus kommt es meist zu verhältnismäßig uneinheitlichen Klassifikationsergebnissen, selbst wenn hochentwickelte Specklefilter verwendet wurden [210][115]. Es erscheint aus diesem Grund sinnvoll, bei der polarimetrischen Klassifikation von SAR Daten, auch die unmittelbare Nachbarschaft der Pixel bei der Entscheidung über die Klassenzugehörigkeit zu berücksichtigen.

Eine Möglichkeit die Nachbarschaft eines Pixels zu berücksichtigen besteht in der Modifikation der Klassenwahrscheinlichkeiten gemäß Gl. 3.17, bzw. der Zuordnung zu Klassen gemäß Gl. 3.20, durch die Klassifikationsergebnisse in der lokalen Umgebung eines Pixels. Ein entsprechender Algorithmus muss also entscheiden, ob für ein Pixel statt der wahrscheinlichsten Klassenzuordnung nicht eventuell eine andere, ähnlich wahrscheinliche, aber besser mit der Nachbarschaft verträglichen Zuordnung, angebracht ist. Korrekt durchgeführt kann man mit einem solchen Vorgehen wesentlich homogenere Klassifikationsergebnisse als mit dem in Abschnitt 3.1.2 beschriebene WISHART-Klassifikationsalgorithmus erzielen [166][167].

3.3.1 Klassifizierung über Expectation Maximisation

Für eine nachbarschaftsgestützte Klassifizierung ist es in einem ersten Schritt nötig, für jedes Pixel einen Grad der Zugehörigkeit zu allen möglichen Klassen zu bestimmen, d.h. es wird jedes Pixel zu allen Klassen, mit gewissen sich unterscheidenden Prozentsätzen, zugeordnet. Dies unterscheidet sich signifikant von dem bereits beschriebenen Vorgehen bei der WISHART-Klassifikation, in der zwar auch die Wahrscheinlichkeitsdichten $p(\langle \mathbf{T} \rangle | \Sigma_i)$ für alle Klassen bestimmt werden, jedes Pixel aber nur einer, nämlich der wahrscheinlichsten Klasse zugeordnet wird. Eine *unscharfe* Zuordnung zu mehreren Klassen wird oft auch mit dem englischen Begriff *fuzzy* oder *fuzzy logic* umschrieben [219]. Sie bietet den Vorteil, dass keine 'harte' Entscheidung über die Klassenzugehörigkeit getroffen wird und somit alle Möglichkeiten der Zuordnung gleichzeitig berücksichtigt werden können [11].

Im folgenden soll ein einfaches iteratives Verfahren beschrieben werden, welches auf den Prinzipien der *Expectation Maximisation* [43] beruht und das den ersten Schritt zu einer nachbarschaftsgestützten Klassifizierung polarimetrischer SAR Daten darstellt. Das Prinzip der Expectation Maximisation ist eng mit dem der Fuzzy-Logic verwandt und wurde im Kontext der Klassifizierung von polarimetrischen SAR Daten erstmals in [139] und [41] und auf PolInSAR Daten in [94] angewandt und in [95] und [96] verfeinert. Ein rein auf unscharfen Entscheidungen im Sinne der fuzzy-Theorie beruhender Klassifikationsalgorithmus findet sich auch in [44], weitere fuzzy-Ansätze zur Klassifikation von SAR Daten, hier mit Hilfe neuronaler Netzwerke, sind in [202] und [25] aufgeführt.

In einem Expectation Maximisation Algorithmus wird versucht, N Pixel zu G verschiedenen

Klassenzentren zuzuordnen, wobei ein optimaler Satz von Klassenzentren Σ durch den Algorithmus gefunden werden soll. Dazu wird zuerst, wie beim Maximum-Likelihood Verfahren, eine sogenannte Log-Likelihood-Funktion der Form

$$\mathcal{L} = \ln \prod_{i=1}^N p(\mathbf{T}_i | \Sigma) = \sum_{i=1}^N \ln p(\mathbf{T}_i | \Sigma) \quad (3.35)$$

aufgestellt, welche durch Finden eines optimalen Satzes von $\Sigma = (\Sigma_1, \dots, \Sigma_G)$ maximiert werden soll. Im vorliegenden Fall einer gemischten Zuordnung der Daten zu G Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ist es naheliegend, folgendes Wahrscheinlichkeitsmodell anzunehmen:

$$p(\mathbf{T}_i | \Sigma) = \sum_{j=1}^G p(\mathbf{T}_i | \Sigma_j) \quad . \quad (3.36)$$

Die $p(\mathbf{T}_i | \Sigma_j)$ entsprechen dabei der WISHART-Verteilung aus Gl. 3.17. Allerdings ist es im Rahmen der Optimierung ausreichend, alle konstanten und klassenunabhängigen Terme der WISHART-Verteilung zu ignorieren. Man erhält dann

$$p(\mathbf{T}_i | \Sigma_j) = \exp \left(-n \text{Spur}(\Sigma_j^{-1} \mathbf{T}_i) \right) / |\Sigma_j|^n \quad . \quad (3.37)$$

Substituiert man nun Gl. 3.37 und Gl. 3.36 in Gl. 3.35, so ergibt sich eine schwierig zu optimierende Log-Likelihood von

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \ln \sum_{j=1}^G \frac{\exp \left(-n \text{Spur}(\Sigma_j^{-1} \mathbf{T}_i) \right)}{|\Sigma_j|^n} \quad . \quad (3.38)$$

Im Rahmen der Expectation Maximisation wird nun angenommen, dass eine versteckte Variable d existiert, welche gemessene Kohärenzmatrizen \mathbf{T}_i derjenigen Verteilung Σ_j zuordnen, von der sie tatsächlich herrühren. d entspricht dabei einer festgelegten Klassenzuordnung, d.h. wenn für \mathbf{T}_i $d = 2$ gilt, dann gehört \mathbf{T}_i zu Klasse 2. Mangels Kenntnis dieser Zuweisungen wird bei der Expectation Maximisation nicht mit festen Zuweisungen sondern stattdessen mit ihrer Wahrscheinlichkeitsdichten $p(d | \mathbf{T}, \Sigma)$ gearbeitet. Selbstverständlich ist anfangs sowohl d als auch Σ unbekannt. Um eine Optimierung durchführen zu können, benötigt man eine initiale Schätzung von einer der beiden Variablen, um dann über einen iterativen Gradientenabstieg eine optimale Lösung zu finden.

Der Algorithmus startet im allgemeinen mit einer initialen Schätzung eines nicht-optimalen Satzes von Klassenzentren $\Sigma^{(0)}$. Dazu wird auf G Regionen ω_j jeweils eine mittlere initiale Kohärenzmatrix

$$\Sigma_j^{(0)} = E(\mathbf{T} | \mathbf{T} \in \omega_j) = \frac{1}{N_j} \sum_{i \in \omega_j} \mathbf{T}_i \quad \text{mit} \quad N_j = \text{Anzahl Pixel in } \omega_j \quad (3.39)$$

bestimmt, wobei es wie beim normalen k-means Algorithmus mehrere Möglichkeiten für die Bestimmung der initialen Regionen ω_i gibt: Sie können z.B. überwacht durch Trainingsgebiete oder

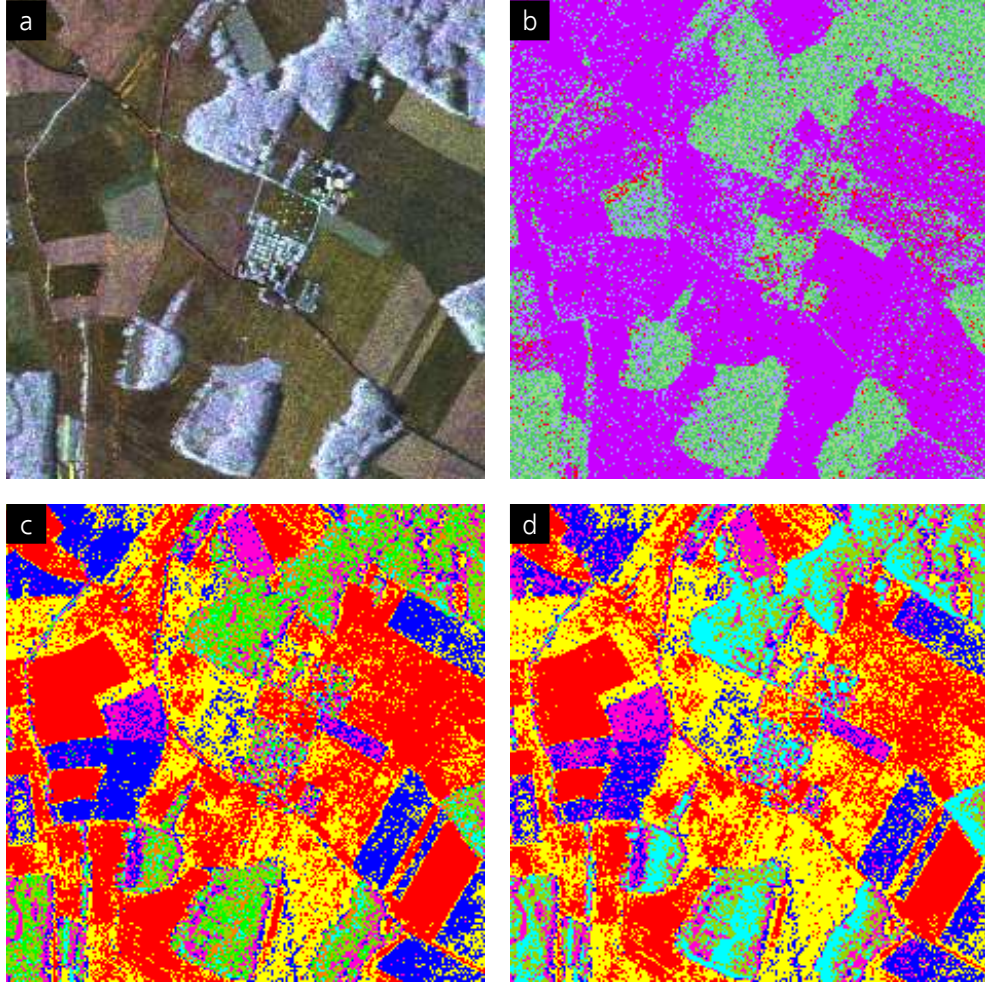


Abbildung 3.13: a) Bildamplitude in PAULI-Darstellung (9 Looks). b) Entropie-Alpha Klassifikation. c) Klassifikation in 8 Klassen mit Wishart k-means. d) Klassifikation in 8 Klassen mit Wishart Expectation Maximisation.

auch unüberwacht durch eine $H_p\text{-}\bar{\alpha}_p$ -Klassifikation oder Schwellwertbildung auf der Bildamplitude erzeugt werden. Eine Alternative ist auch eine Zufallsinitialisierung, d.h. eine völlig zufällige Zuweisung von Pixel zu Klassen.

Anschließend bestimmt man in dem sogenannten *Expectation*-Schritt mit Hilfe von $\Sigma_j^{(0)}$ für jedes Pixel und für jede Klasse die *a-posteriori* Wahrscheinlichkeit $p(d=j|\mathbf{T}, \Sigma)$, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel der Klasse j angehört, gegeben der gemessenen Matrix \mathbf{T} und des geschätzten Satzes möglicher Klassenzentren Σ . $p_{ij} = p(d=j|\mathbf{T}_i, \Sigma_j)$ stellen also den prozentualen Grad der Zugehörigkeit der Kohärenzmatrizen \mathbf{T}_i zu der durch Σ_j beschriebenen Wahrscheinlichkeitsdichte dar. Dies impliziert, dass für die Zugehörigkeiten

$$p_{ij} \in [0, 1] \quad \forall i, j \quad \text{sowie} \quad \sum_{j=1}^G p_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3.40)$$

gelten muss. Es lässt sich zeigen [25][44], dass für den Fall der vereinfachten WISHART-Verteilung

aus Gl. 3.37 sich die *a-posteriori* Wahrscheinlichkeiten folgendermaßen bestimmen lassen:

$$p_{ij}^{(k)} = \frac{p(T_i | \Sigma_j^{(k)})}{\sum_{l=1}^G p(T_i | \Sigma_l^{(k)})} = \frac{\exp \left(-n \text{Spur} \left((\Sigma_j^{(k)})^{-1} \mathbf{T}_i \right) \right) / |\Sigma_j^{(k)}|^n}{\sum_{l=1}^G \exp \left(-n \text{Spur} \left((\Sigma_l^{(k)})^{-1} \mathbf{T}_i \right) \right) / |\Sigma_l^{(k)}|^n} \quad (3.41)$$

k kennzeichnet den aktuellen Iterationsschritt; nach der Initialisierung gilt also $k = 0$. Die Summierung über alle Klassen stellt die Normierung der p_{ij} auf den Wertebereich $[0, 1]$ sicher.

Mit Hilfe der bekannten Zugehörigkeiten p_{ij} lassen sich jetzt im Rahmen eines sogenannten *Maximisation*-Schritt aktualisierte Klassenzentren

$$\Sigma_j^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N p_{ij}^{(k)} \mathbf{T}_i}{\sum_{i=1}^N p_{ij}^{(k)}} \quad (3.42)$$

bestimmen. Im Fall der vereinfachten Dichte aus Gl. 3.37 führen Gl. 3.41 und Gl. 3.42 zusammen zu einer lokalen Minimierung der Log-Likelihood unter der Annahme der Schätzung $\Sigma_j^{(k)}$ [11][44][25]. Um ein globales Minimum zu erreichen, wird der Expectation- und Maximisation-Schritt iterativ solange wiederholt bis ein geeignetes Abbruchkriterium erreicht ist. Dies kann z.B. eine Konvergenz der p_{ij} zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen [25], eine Konvergenz der Klassenzentren selbst [44], eine Prozentsatz an Pixeln, die ihre wahrscheinlichste Klasse wechseln oder auch eine gegebene Anzahl an Iteration sein.

In Abb. 3.13 findet sich der Vergleich einer Klassifikation über Expectation Maximisation mit der in Kapitel 3.1.2 vorgestellten K-means WISHART-Klassifikation. Verwendet wurden ein Ausschnitt der Daten aus Abb. 3.6, wobei für die Mittelung der Kohärenzmatrizen diesmal nur neun unabhängige Datenpunkte verwendet wurden, was im allgemeinen nicht ausreichend ist, um rauscharme Kohärenzmatrizen zu erhalten. Des weiteren wurde eine zufällige Initialisierung vorgenommen; als Abbruchkriterium wurde in beiden Fällen eine feste Zahl von zehn Iterationen verwendet. Da das Verfahren der Expectation Maximisation prozentuale Zugehörigkeiten für jede mögliche Klasse liefert, wurde für die Farbgebung jedes Pixels die jeweils wahrscheinlichste Klasse verwendet. Wie zu erwarten erscheinen die beiden Klassifikationsergebnisse in Abb. 3.13c und 3.13d sehr verrauscht, was in der geringen Mittelung der Kohärenzmatrizen begründet ist. Ansonsten ist eine hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Ergebnissen zu beobachten. Expectation Maximisation scheint etwas homogenere Ergebnisse über den Waldflächen und etwas weniger homogene Ergebnisse über der landwirtschaftlichen Nutzflächen zu liefern. Wichtig ist aber, dass die Expectation Maximisation auch Aussagen über die Wahrscheinlichkeiten erlaubt, mit der ein gegebenes Pixel in eine andere als die wahrscheinlichste Klasse fällt, während das K-means Verfahren nur jeweils die wahrscheinlichste Klasse liefert.

3.3.2 Probabilistische Relaxation der Klassen

Bei einer nachbarschaftsgestützten Klassifikation sollen die Klassifikationsergebnisse in der Umgebung eines Pixels herangezogen werden, um einen bessere Einordnung in die richtige Klasse zu erreichen, als das aus der einzelnen Kohärenzmatrix des Pixels alleine möglich ist. Dieser Idee liegt die Annahme zugrunde, dass benachbarte Pixel statistisch nicht unabhängig voneinander sind: In der Realität ist kein räumlich zufälliges Klassifikationsergebnis zu erwarten, sondern

zusammenhängende Flächen gewisser Größen: Wenn die unmittelbare Nachbarschaft eines zu klassifizierenden Pixels bereits mit großer Wahrscheinlichkeit der Klasse ω_j zugeordnet wurde, besteht auch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass auch das betrachtete Pixel in diese Klasse fällt.

Ein solches Konzept wird im Rahmen der sogenannten *Probabilistic Label Relaxation* verfolgt. Ihr Ziel ist es, ein insgesamt räumlich konsistenteres Klassifikationsergebnis zu erzielen, indem Nachbarschaftsbeziehungen zur Entscheidungsfindung herangezogen werden [198]. Diese Methode stammt aus dem Gebiet der überwachten Klassifizierung und stellt einen Postklassifikationsschritt zur Verbesserung der Klassifikationsergebnisse dar [85]. Im Rahmen der Klassifikation polarimetrischer SAR Daten kann sie aber auch, wie im folgenden beschrieben, gewinnbringend im Rahmen eines unüberwachten Verfahrens eingesetzt werden.

Die Basis der probabilistischen Klassenrelaxation ist die Einführung von sogenannten *a-priori* Kompatibilitätskoeffizienten $p(n, \omega_i | m, \omega_j)$, welche beschreiben, wie groß die bedingte Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Pixel n der Klasse ω_i zugeordnet ist, wenn ein benachbartes Pixel m in der Klasse ω_j liegt. Damit lässt sich direkt die Verbundwahrscheinlichkeit $p(n, \omega_i)$ bestimmen, dass das Pixel n der Klasse ω_i zugehörig ist:

$$p(n, \omega_i) = p(n, \omega_i | m, \omega_j) \cdot p(m, \omega_j) \quad , \quad (3.43)$$

also die Wahrscheinlichkeit $p(m, \omega_j)$, dass das Nachbarpixel m in der Klasse ω_j liegt, multipliziert mit der gegenseitigen Kompatibilität. Die Wahrscheinlichkeit $p(n, \omega_i)$ in Gl. 3.43 gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit von Pixel n ausschließlich über die Betrachtung seiner Nachbarschaft und ohne Berücksichtigung des Inhalts des Pixels selber. In aller Regel treten natürlich mehrere mögliche Klassen auf, außerdem ist es naheliegend, eine größere Nachbarschaft von insgesamt L Pixeln zu berücksichtigen. Hierauf basierend definiert man eine Nachbarschaftsfunktion

$$q(n, \omega_i) = \sum_{m=1}^L \sum_{j=1}^G p(n, \omega_i | m, \omega_j) p(m, \omega_j) \quad , \quad (3.44)$$

welche die gesamte Verbundwahrscheinlichkeit über alle Nachbarn und Klassen hinweg beschreibt, dass Pixel n in Klasse ω_i fällt.

Nach Anwendung des Expectation Maximisation Verfahrens sind die sich direkt aus den Klassenzentren ergebenden Wahrscheinlichkeiten der Klassenzugehörigkeit gemäß Gl. 3.37 bekannt. Unter Annahme identischer a-priori Wahrscheinlichkeiten gilt $p(m, \omega_j) = p(\mathbf{T}_m, \mathbf{\Sigma}_j)$ und Gl. 3.44 kann ausgewertet werden. Damit erhält man zwei unterschiedliche Arten von Klassenzugehörigkeiten: $q()$, basierend nur auf dem räumlichen Kontext eines Pixels und $p()$, basierend nur auf dem polarimetrischen Informationsgehalt. Über Multiplikation dieser beiden Wahrscheinlichkeiten und mit der Initialisierung $p_q^{(1)} = p(\mathbf{T}_m, \mathbf{\Sigma}_i)$, bekannt aus dem Expectation-Schritt des Expectation Maximisation Verfahrens, ergibt sich folgende alternative Verbundwahrscheinlichkeit zur Beschreibung der Klassenzugehörigkeit

$$p_q^{(h+1)}(n, \omega_i) = \frac{p^{(h)}(n, \omega_i) q^{(h)}(n, \omega_i)}{\sum_{j=1}^G p^{(h)}(n, \omega_j) q^{(h)}(n, \omega_j)} \quad , \quad (3.45)$$

wobei h den aktuellen Iterationsschritt kennzeichnet. Gl. 3.45 berücksichtigt sowohl die polarimetrische Zuordnung über die WISHART-Verteilung als auch die räumliche Zuordnung über die Nachbarschaftsfunktion. Die Verbundwahrscheinlichkeit $p_q^{(1)}(n, \omega_i)$ führt in einem weiteren Iterationsschritt auf eine aktualisierte Nachbarschaftsfunktion

$$q^{(h+1)}(n, \omega_i) = \sum_{m=1}^L \sum_{j=1}^G p(n, \omega_i | m, \omega_j) p_q^{(h)}(m, \omega_j) \quad (3.46)$$

Die Iteration über Gl. 3.45 und Gl. 3.46 wird einige Male wiederholt, um eine akzeptable Konvergenz zu erreichen. Streng genommen vergrößert sich durch jede Iteration die insgesamt berücksichtigte Nachbarschaft, wodurch es zu einer immer stärkeren Homogenisierung kommt. Aus diesem Grund ist ein Abbruch nach ca. 5-10 Iterationen sinnvoll.

Es verbleibt die Frage, wie die Kompatibilitätskoeffizienten zu bestimmen sind. Idealerweise liegt ein räumliches Modell der betrachteten Gegend vor, beispielsweise abgeleitet aus einem Geoinformationssystem (GIS). In einer landwirtschaftlichen Gegend lassen sich auch mit Kenntnis der Pixelgröße des Sensors und der typischen Feldgröße Aussagen darüber treffen, wie wahrscheinlich eine bestimmte Klasse auf eine andere in einem benachbarten Pixel trifft. Im allgemeinen ist aber davon auszugehen, dass die Kompatibilitätskoeffizienten unbekannt sind. In einem solchen Fall ist es angebracht, nur zwei verschiedene Koeffizienten zu verwenden: Einen höheren für $\omega_i = \omega_j$ und einen niedrigeren für $\omega_i \neq \omega_j$. Ihr Verhältnis gibt an, wieviel wahrscheinlicher das Aufeinandertreffen gleicher Klassen als das ungleicher Klassen ist. Je nach Höhe des Verhältnisses werden mit einem solchen Vorgehen ganz generell homogene Flächen stark unterstützt und es kommt insgesamt zu homogeneren Klassifikationsergebnissen.

Im Kontext der Klassifikation von polarimetrischen SAR Daten ist es nicht sinnvoll, die probabilistische Klassenrelaxation als Postprozessierungsschritt auf ein Ergebnis wie das in Abb. 3.13 anzuwenden. Die schlechte und insbesondere inhomogene Klassifikation durch Expectation Maximisation, welche durch den bei SAR Daten inhärenten Speckleeffekt verursacht wurde, führt automatisch auch zu einem ungenau bestimmten Satz von mittleren Kohärenzmatrizen Σ . Ein anschließender Relaxationsprozess wird zwar über den räumlichen Kontext prinzipiell das Klassifikationsergebnis homogenisieren, kann aber nicht mehr korrigieren, dass die eigentlichen Klassenzentren nicht optimal definiert sind. Daher ist es angebracht, den beschriebenen Relaxationsprozess bereits während der Iterationen der Expectation Maximisation durchzuführen, um so zu erreichen, dass die mittleren Kohärenzmatrizen $\Sigma_j^{(k)}$ bereits auf teilweise homogenisierten Zwischenergebnissen bestimmt werden.

Ein sinnvolle nachbarschaftsgestützte Klassifikation über Expectation Maximisation und probabilistische Klassenrelaxation startet mit einer initialen Schätzung eines Satzes von mittleren Kohärenzmatrizen analog zu Gl. 3.39. Anschließend werden für jedes Bildpixel und für jede Klasse die a-posteriori Wahrscheinlichkeiten der Klassenzugehörigkeit, wie in Gl. 3.41 beschrieben, bestimmt. Nach diesem Schritt wird im Rahmen der probabilistischen Relaxation iterativ gemäß Gl. 3.44 und Gl. 3.45 die Nachbarschaftsfunktionen und daraus abgeleitet, die Verbundwahrscheinlichkeiten p_q für jedes Pixel und für jede Klasse bestimmt, wobei eine feste Anzahl von H Iterationen vorgegeben wird (z.B. fünf). Mit Hilfe der nun bekannten Werte von p_q können aktualisierte Klassenzentren bestimmt werden (vergl. Gl. 3.42)

$$\Sigma_j^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N p_q^{(k)}(i, \omega_j) \mathbf{T}_i}{\sum_{i=1}^N p_q^{(k)}(i, \omega_j)} \quad (3.47)$$

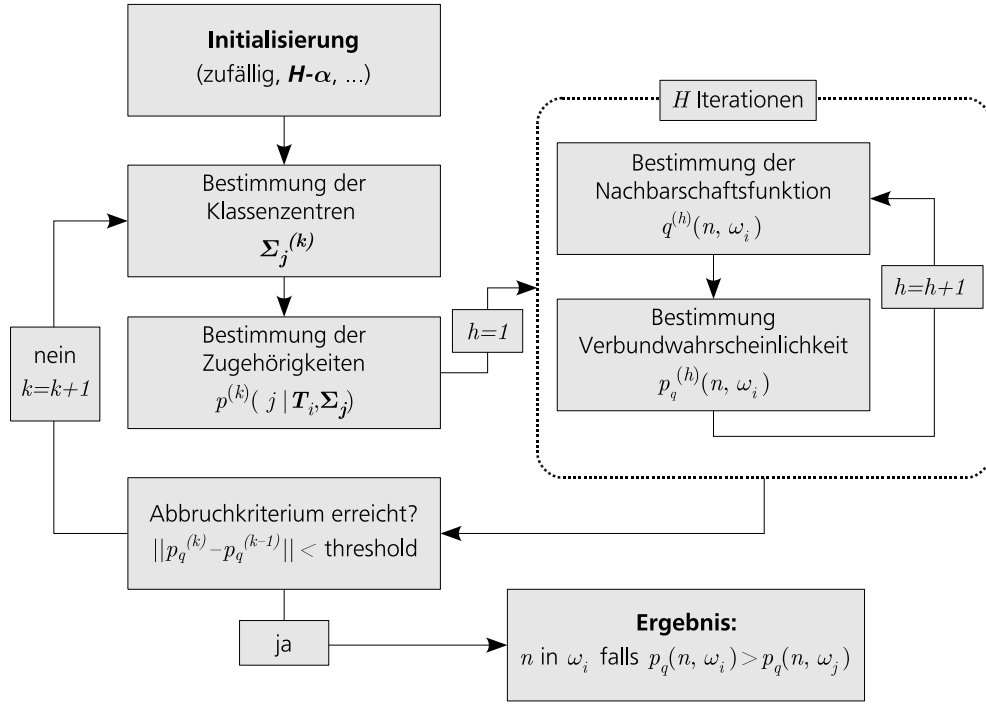


Abbildung 3.14: Blockdiagramm der unüberwachten polarimetrischen Klassifizierung über Expectation Maximisation kombiniert mit probabilistischer Relaxation der Klassen.

Dieses Vorgehen wird nun, genau wie beim Verfahren der Expectation Maximisation, iterativ solange fortgeführt bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Beispielsweise kann in jeder Iteration nach Bestimmung der Verbundwahrscheinlichkeiten eine Entscheidung über die wahrscheinlichste Klassenzugehörigkeit von Pixel n getroffen werden:

$$\mathbf{T}_n \in \omega_i \quad \text{falls} \quad p_q(n, \omega_i) > p_q(n, \omega_j) \quad \forall j \neq i \quad (3.48)$$

Wechselt von einer Iteration zur nächsten nur noch ein Prozentsatz an Pixeln kleiner als ein gewisser Schwellwert (z.B. 1%) die Klasse, so kann die Iteration abgebrochen werden und die Klassenzuordnung als endgültig angesehen werden. Ein weiteres geeignetes Abbruchkriterium ist die Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten selber, also wenn $\|p_q^{(k)} - p_q^{(k-1)}\|$ einen gewissen Schwellwert unterschreitet.

Das gesamte vorgeschlagene Iterationsschema ist in Abb. 3.14 nochmals als Blockdiagramm dargestellt. In praktischen Versuchen hat es sich zudem als vorteilhaft herausgestellt, vor Beginn der Berücksichtigung der Nachbarschaftsfunktionen einige wenige reine Expectation Maximisation Iterationen durchzuführen, um bereits eine gewisse Stabilisierung von Σ zu erreichen. Dies führt im allgemeinen zu einer wesentlich schnelleren Konvergenz, da anfänglich widersprüchliche Zuordnungen durch p und q vermieden werden.

3.3.3 Experimentelle Ergebnisse

Um die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Methode zur nachbarschaftsgestützten Klassifikation von polarimetrischen SAR Daten zu analysieren wurden ver-

schiedene Klassifikationen einer landwirtschaftlich geprägten Szene mit relativ großen homogenen Flächen vorgenommen. Verwendet wurden wiederum der Ausschnitt der Daten aus Abb. 3.13 mit einer Mittelung der Kohärenzmatrizen über nur neun unabhängige Datenpunkte; es wird also wie zuvor mit relativ schlecht bestimmten Kohärenzmatrizen gearbeitet. Als Initialisierung des Expectation Maximisation Prozesses wurde eine zufällige Zuordnung zu insgesamt acht Klassen vorgenommen. Da diese Art der Initialisierung zu schlecht definierten und völlig zerstückelten Klassen führt, welche im Zuge der Einbeziehung von Nachbarschaften falsch räumlich homogenisiert werden würden, sind vor Beginn der Nachbarschaftsiterationen in allen Fällen fünf reine Expectation Maximisation Iterationen durchgeführt worden. Dieses Vorgehen wäre mit anderen Initialisierungskonzepten nicht nötig und entspricht im Prinzip einer Initialisierung des Gesamtprozesses mit dem Klassifikationsergebnis nach fünf Expectation Maximisation Iterationen.

Zur Bestimmung der Nachbarschaftsfunktion gemäß Gl. 3.44 wurde in allen gezeigten Beispielen eine GAUSS'sche Umgebung der Größe 5x5 verwendet. Dies bedeutet, dass insgesamt 24 Nachbarpixel in die Summation mit einbezogen wurden. Bei Verwendung einer kleineren Nachbarschaft, möglich sind beispielsweise auch eine 3x3 GAUSS'sche Umgebung oder eine einfache 4er Nachbarschaft, ergeben sich allerdings äußerst ähnliche Ergebnisse: Durch die Nachbarschaftsiterationen werden auch hier die Klassifikationsergebnisse weiter entfernter Pixel nach und nach mit in die Nachbarschaftsfunktion mit einbezogen. Als Abbruchkriterium diente die Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten $\|p_q^{(k)} - p_q^{(k-1)}\|$. Sinkt ihr Wert unter 1%, wird der Iterationsprozess beendet und jedes Pixel der jeweils wahrscheinlichsten Klasse zugeordnet.

In Abb. 3.15 sind verschiedene Klassifikationsergebnisse gezeigt, wobei mit nur zwei verschiedenen Kompatibilitätskoeffizienten gearbeitet wurde, deren Verhältnis zwischen den Ergebnissen variiert wurde. In jedem Iterationsschritt wurden jeweils $H = 5$ Iterationen auf der Nachbarschaftsfunktion vorgenommen. Abb. 3.15b zeigt das Ergebnis wenn man identische Wahrscheinlichkeiten für den Übergang von einer Klasse auf die gleiche Klasse, wie für den Übergang von einer Klasse auf eine andere Klasse annimmt. Damit wird die Nachbarschaftsfunktion bedeutungslos und das Klassifikationsergebnis entspricht wie zu erwarten dem der normalen Expectation Maximisation. Es ergibt sich eine relativ stark verrauschte Klassifikation. In Abb. 3.15c wurde eine doppelt so hohe Wahrscheinlichkeit für den Übergang auf die gleiche wie auf eine andere Klasse angenommen. Das Klassifikationsergebnis wird bereits deutlich homogener, und es zeigen sich weniger Störpixel. Erhöht man das Verhältnis der beiden Kompatibilitätskoeffizienten weiter (Abb. 3.15d-3.15f), so kommt es zu immer stärker homogenisierten Ergebnissen. Trotz der geringen Mittelung der Kohärenzmatrizen ist es mit dem beschriebenen Verfahren möglich, qualitativ ansprechende und hochauflösende Klassifikationsergebnisse zu erhalten. So bleiben einige Punktziele auch bei sehr starker Homogenisierung (Abb. 3.15f) als punktförmige Objekte im Klassifikationsergebnis erhalten.

Abb. 3.17 stellt den Verlauf der Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten dar. In allen Fällen konvergiert das Verfahren relativ schnell nach 10-15 Iterationsschritten. Zwischen den einzelnen Kurven lassen sich gewisse Abweichungen registrieren, die darauf zurückzuführen sind, dass versucht wird, eine Konvergenz über zwei konkurrierende Terme, den der Nachbarschaft und den der polarimetrischen Information, zu erreichen. Es kann daher zu Unstimmigkeiten kommen, die sich unterschiedlich schnell erst nach einigen Iterationen korrigieren. Die Konvergenzrate selbst scheint nur gering von dem Kompatibilitätskoeffizienten abzuhängen.

Die Ergebnisse in Abb. 3.16 zeigen Klassifikationsergebnisse des gleichen Testgebiets, wobei nun die Anzahl der Iterationen auf der Nachbarschaftsfunktion variiert wurde. Als Verhältnis der Kompatibilitätskoeffizienten wurde in allen Fällen eine zehnfach so hohe Wahrscheinlichkeit für

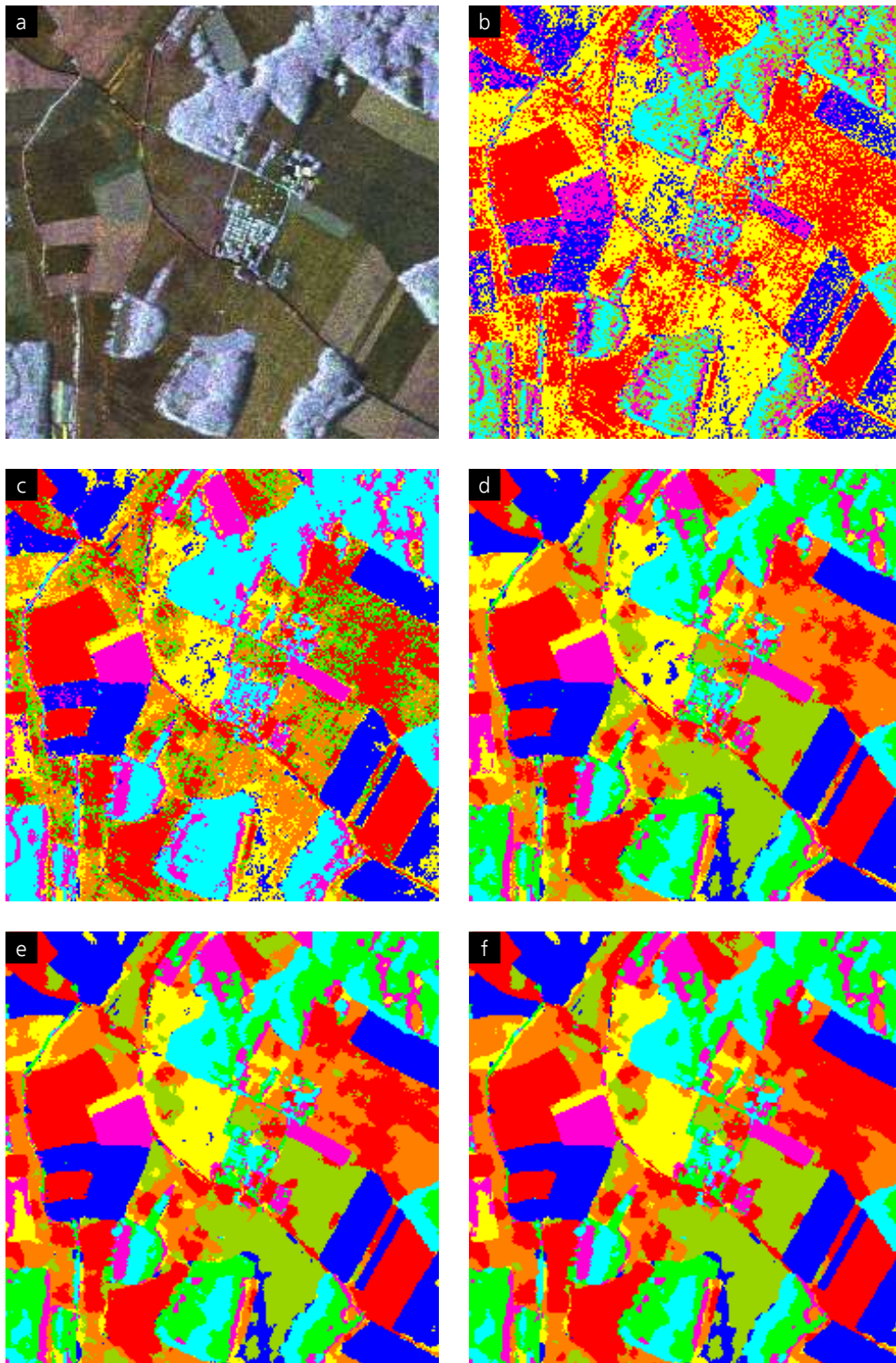


Abbildung 3.15: Klassifikationsergebnisse der nachbarschaftsgestützten Expectation Maximisation mit verschiedenen Graden von Nachbarschaftswahrscheinlichkeiten. a) Bildamplitude. b) identische Nachbarschaftswahrscheinlichkeiten. c) Gleiche Nachbarklasse doppelt so wahrscheinlich wie andere Klasse. d) fünf mal so wahrscheinlich. e) 10 mal so wahrscheinlich. f) 100 mal so wahrscheinlich.

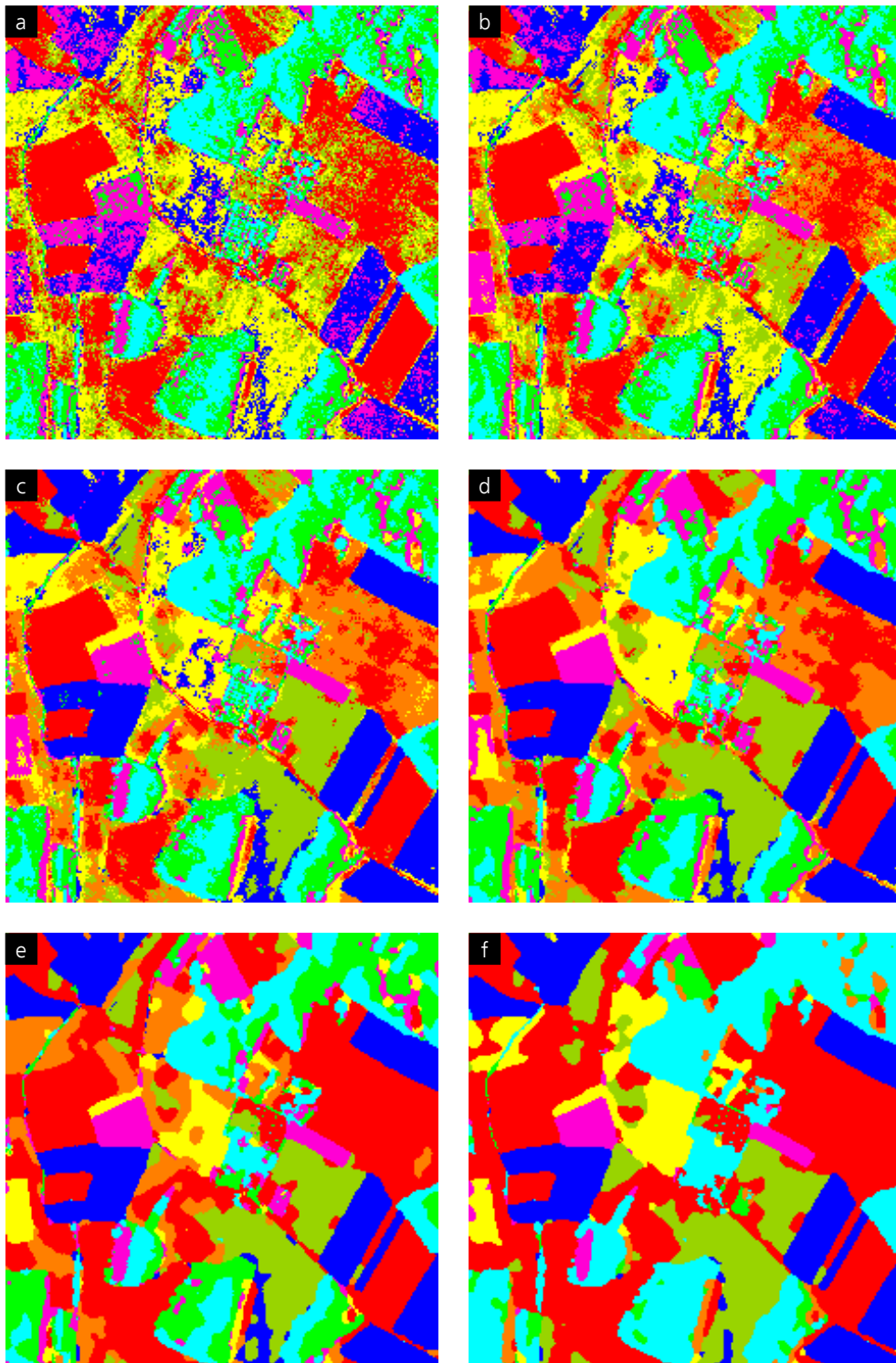


Abbildung 3.16: Klassifikationsergebnisse der nachbarschaftsgestützten Expectation Maximisation mit verschiedener Anzahl von Nachbarschaftsiterationen. a) eine Iteration. b) zwei Iterationen. c) drei Iterationen. d) fünf Iterationen e) 10 Iterationen f) 20 Iterationen.

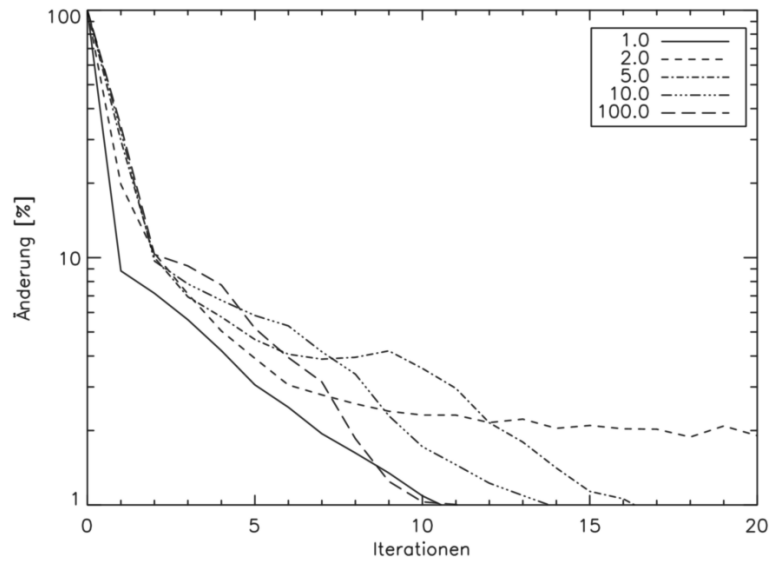


Abbildung 3.17: Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten $\|p_q^{(k)} - p_q^{(k-1)}\|$ bei verschiedenen Kompatibilitätskoeffizienten (vergl. Abb. 3.15)

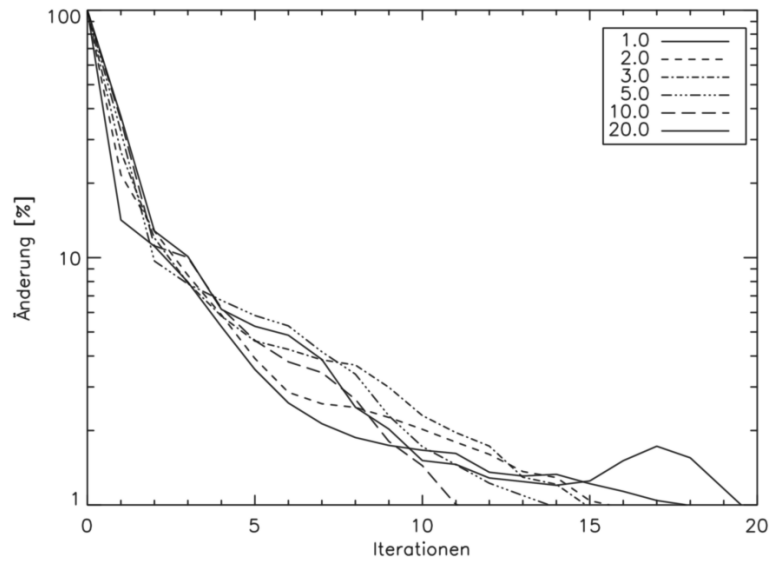


Abbildung 3.18: Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten $\|p_q^{(k)} - p_q^{(k-1)}\|$ bei verschiedener Anzahl von Nachbarschaftsiterationen (vergl. Abb. 3.16)

den Übergang auf die gleiche wie auf eine andere Klasse angenommen. Bei jeweils nur einer internen Iteration auf der Nachbarschaftsfunktion pro Gesamtiteration (Abb. 3.16a) ergibt sich trotz insgesamt über 15 Iterationen ein relativ verrauschtes Ergebnis. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nur die unmittelbare Nachbarschaft berücksichtigt wird, und die Nachbarschaftsfunktion auch keine Zeit hat zu konvergieren, bevor ein neuer Satz von Σ bestimmt wird. Mit steigender Anzahl von Iterationen auf der Nachbarschaftsfunktion (Abb. 3.16b-3.16f) ergibt sich ein immer stärker homogenisiertes Ergebnis, da durch die Iterationen die insgesamt mit einbezogene Nachbarschaft immer weiter ansteigt und nicht auf die gewählte Größe der GAUSS'schen Umgebung beschränkt bleibt. Abhängig vom Testgebiet ist es dem Benutzer überlassen, welcher

Wert hier für sinnvoll erachtet wird; im vorgestellten Fall bilden sich typischerweise mit ca. 5-10 Iterationen ausreichend homogene Flächen.

Abb. 3.18 stellt wiederum den Verlauf der Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten bei Variation der Anzahl der Iterationen auf der Nachbarschaftsfunktion dar. Wie zuvor konvergiert das Verfahren in allen Fällen relativ schnell nach 10-15 Iterationsschritten; auch die Konvergenzrate selbst scheint wieder nur gering von der Iterationsanzahl abzuhängen.

Insgesamt scheint eine zu hohe Anzahl von Iterationen auf der Nachbarschaftsfunktion nicht sehr vorteilhaft zu sein. Es kommt zu einer Überbetonung des räumlichen Kontextes während gleichzeitig die spektrale Zuordnung über die WISHART-Verteilung der Kohärenzmatrizen vernachlässigt wird. Als Folge werden an sich identische Flächen in frühen Iterationen zufällig getrennt und über die Nachbarschaftsbeziehungen homogenisiert. Spätere Iterationen können dies nicht mehr korrigieren, da die statistischen Kosten für der Aufhebung des räumlichen Kontext höher sind als der Gewinn durch die spektral bessere Zuordnung. Ebenfalls unvorteilhaft ist ein zu hohes Verhältnis der Kompatibilitätskoeffizienten, da dies einen Wechsel in eine andere Klasse unnötig erschwert. Insbesondere bei relativ kleinräumigen Strukturen in der betrachteten Szene sollten der Kompatibilitätskoeffizient eher klein gehalten werden, um eine zu starke Homogenisierung zu vermeiden. Als sinnvolle Werte haben sich etwa 5-10 Iterationen auf der Nachbarschaftsfunktion und ein Verhältnis der Kompatibilitätskoeffizienten zwischen 10 und 100 herausgestellt, wobei diese Werte als szenenabhängig anzusehen sind.

3.4 Schlussfolgerungen

Die SAR Polarimetrie als vektorielle Erweiterung der konventionellen SAR Abbildung stellt eine der wichtigsten multimodalen Techniken in der SAR Fernerkundung dar. Durch ihre Konzepte wird es möglich, die Anzahl von Observablen pro Pixel auf 3 komplexe Werte zu erhöhen und so wesentlich mehr Informationen über die zurückstreuenden Objekte zu sammeln. Im allgemeinen wurde bislang die Rückstreuung als völlig isotrop angenommen und eventuelle Abweichungen davon in der weiteren Datenverarbeitung nicht berücksichtigt. Dass dies ungenügend ist, zeigen die Untersuchungen in Kapitel 3.2.1. Durch eine diskrete Subaperturanalyse konnte aufgezeigt werden, dass die polarimetrischen Signaturen häufig starken Variationen während der SAR Integration unterworfen sind. Dies gilt insbesondere für quasiperiodische Oberflächen, welche häufig bei landwirtschaftlich genutzten Flächen auftreten. Anisotrope Rückstreuung führt hier zu gemischten Signalen, welche zu Missklassifikationen und fehlerhaften Parameterschätzungen führen können.

In Kapitel 3.2.2 wird daher ein statistisches Detektionsverfahren basierend auf Maximum-Likelihood Verhältnissen vorgestellt, welches in der Lage ist, Pixel mit unstationären Verhalten mit einer konstanten Fehlalarmrate zu lokalisieren. Damit wird es möglich, Aussagen über die Verlässlichkeit der polarimetrischen Signaturen zu treffen. Zusätzlich können mit einem ähnlichen Ansatz die jeweiligen Subaperturen mit anisotropen Verhalten detektiert werden. Dies erlaubt letztendlich eine Kompensation ihres störenden Einflusses, wie in Kapitel 3.2.3 dargelegt. Technisch gesehen stellt das vorgeschlagene Verfahren eine Kombination statistischer Verfahren aus der SAR Polarimetrie mit Signalverarbeitungsmethoden aus der SAR Prozessierung dar und zeigt deutlich, wie multimodale Datenverarbeitung neue Möglichkeiten erschließt.

Die vorgeschlagenen Beobachtungen und Methoden sind insofern bedeutend, als der Effekt der anisotropen Rückstreuung üblicherweise ignoriert wird, aber dennoch zu großen Fehlern führen

kann. Moderne Sensorsysteme entwickeln sich zunehmend hin zu immer höheren Auflösungen und damit hin zu breiteren Abstrahlwinkeln und höheren Bandbreiten. Es ist daher zu erwarten, dass in Zukunft störende anisotrope Effekte sogar noch wesentlich häufiger in aufgezeichneten Daten auftreten werden. Eine präzise Erkennung und Kompensation ihres Einflusses wird dann ein wichtiger Verarbeitungsschritt sein.

Kapitel 3.3 widmet sich im Gegensatz dazu ganz der statistischen Gruppierung polarimetrischer SAR Daten: Ziel ist es hier, ein möglichst homogenes Klassifikationsergebnis zu erreichen. Bislang wurde vor allem versucht, dies durch geschickte adaptive Speckle-Vorfilterung der Kohärenzmatrizen zu erreichen; die eigentliche Klassifikation bestand hingegen meist in Standard-Gruppierungstechniken adaptiert auf die statistischen Charakteristika von SAR Daten. Der in diesem Kapitel verfolgte Weg versucht stattdessen, den räumlichen Kontext direkt in die statistische Relaxation der Likelihood-Funktion mit einzubeziehen und damit, trotz starkem Speckleeffekts, gute Klassifikationsergebnisse zu erzielen. Erreicht wird das durch Verschneidung eines iterativen Expectation Maximisation Algorithmus mit dem Prinzip der probabilistischen Klassenrelaxation. Beide Verfahren zusammen sorgen für ein räumlich homogenes, polarimetrisch motiviertes Klassifikationsergebnis.

Wie gezeigt werden konnte, ist das vorgeschlagene Verfahren der nachbarschaftsgestützten Klassifikation den bekannten konventionellen Verfahren, insbesondere bei geringer Mittelung der Kohärenzmatrizen, deutlich überlegen. Dies ist insofern von Bedeutung, als eine geringe Mittelung zwar einen ausgeprägten Speckleeffekt, aber auch eine hohe räumliche Auflösung bedeutet. Die probabilistische Relaxation über die Nachbarschaft führt zu einer starken Glättung homogener Klassen, Klassengrenzen und punktförmige Objekte bleiben aber in voller Auflösung erhalten. Eine adaptive Specklefilterung wird also hier durch eine direkte adaptive Klassifikation ersetzt. Die Nachteile des Verfahrens sind typisch für alle unüberwachten Klassifikationsverfahren: So kann die gewählte Anzahl Klassen einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben, gleiches gilt für die jeweilige Initialisierungsstrategie. Insgesamt lässt sich aber sagen, dass das vorgeschlagene Verfahren immer dann, wenn homogene Klassifikationsergebnisse und keine punktbasierte Zuordnungen gewünscht sind, eine erheblich höhere Qualität der Klassifikationsergebnisse als konventionelle Ansätze produziert.

4 SAR Interferometrie

4.1 Grundlagen

SAR Interferometrie ist eine weitere wichtige Erweiterung der einkanaligen SAR Abbildung. Eine mehrkanalige Aufnahme wird hier durch Änderung der Aufnahmeposition realisiert, d.h. es werden mehrere Aufnahmen unter verschiedenen Einfallswinkeln miteinander kombiniert, um zusätzliche Informationen über die beobachtete Szene zu gewinnen. Die Analyse der interferometrischen Phasendifferenz erlaubt dabei insbesondere Aussagen über die Geländetopographie sowie über deren Änderungen. Auch die SAR Interferometrie ist für sich alleine genommen bereits eine multimodale Technik; ihre Moden entsprechen hier mehreren nacheinander erfolgten Aufnahmen von parallelen Flugbahnen (Repeat-Pass Interferometrie) oder von zwei oder mehreren simultan arbeitenden SAR Antennen in einer interferometrischen Anordnung (Single-Pass Interferometrie). Ähnlich wie die SAR Polarimetrie kann sie aber auch mit weiteren multimodalen Ansätzen kombiniert werden. Bereits erwähnt wurde die polarimetrische SAR Interferometrie [143][192][32][6], also eine Verschneidung mit der SAR Polarimetrie. Darüber hinaus existieren diverse Multitemporal-, Multifrequenz- und Multibasislinienansätze, welche vor allem versuchen, die Struktur von Vegetationsschichten und Änderungen in ihr zu analysieren [3][82][199][200]. Aufgrund von Bewegungsfehlern und der komplizierteren Aufnahmegeometrie eignen sich flugzeuggestützte Sensoren bislang nur für Single-Pass Interferometrie. Gleichzeitig sind aber langen Wellenlängen in Kombination mit große Basislinien, welche nur mit Repeat-Pass Sensoren zu erzielen sind, essentiell für viele multimodale interferometrische Auswertetechniken. Die folgenden Kapitel widmen sich daher vor allem der Realisierung von hochgenauer Repeat-Pass Interferometrie mit flugzeuggestützten Sensoren, wobei vor allem spezielle Zeit-Frequenz Analysen und Korrekturen zur Verbesserung der Datenqualität und zur Kalibrierung der Abbildungsgeometrie zum Einsatz kommen.

4.1.1 Konzepte der SAR Interferometrie

Die der SAR Interferometrie zugrundeliegende Aufnahmegeometrie ist in Abb. 4.1 illustriert. Die beobachtete Szene wird von zwei unterschiedlichen Antennenpositionen beobachtet, welche durch eine Basislinie der Länge B getrennt sind. Von diesen beiden Positionen werden zwei SAR Aufnahmen gemacht: Die sogenannte *Master*-Aufnahme mit dem Signal s_1 und die sogenannte *Slave*-Aufnahme mit dem Signal s_2 . Ein Streuer mit der topographischen Höhe z und der Rückstreuamplitude ρ wird von der Masterposition unter dem Blickwinkel θ beobachtet. Die Schrägentfernungen zwischen diesem Streuer und den beiden Sensorpositionen sind unterschiedlich und werden mit r_1 und r_2 bezeichnet. Die topographische Höhe z des Streuers hat einen Einfluss auf den Blickwinkel θ , welche bei einem normalen einkanaligen SAR Sensor unbekannt ist, da nur die Schrägentfernung bestimmt werden kann.

Prinzipiell erlaubt die Messung der zweiten Schrägentfernung r_2 und die genaue Kenntnis der Basislinie eine Bestimmung des Blickwinkels und damit auch der topographischen Höhe des

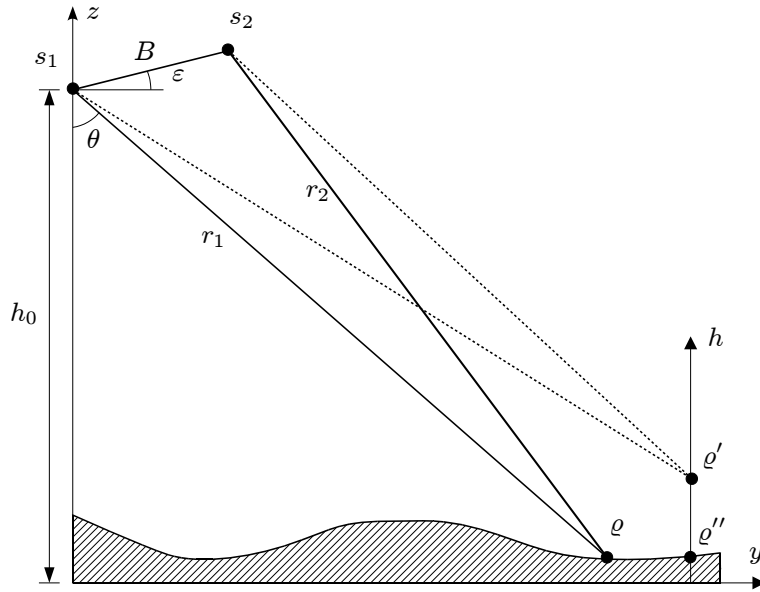


Abbildung 4.1: Abbildungsgeometrie der SAR Interferometrie.

Streuers durch einfache Trigonometrie. Unter Verwendung des Kosinussatzes lässt sich r_2 in Funktion von r_1 und den Basislinienparametern ausdrücken:

$$r_2^2 = r_1^2 + B^2 + 2r_1B \sin(\theta - \varepsilon) \quad \Rightarrow \quad \sin(\theta - \varepsilon) = \frac{r_2^2 - r_1^2 - B^2}{2r_1B} \quad , \quad (4.1)$$

wobei ε den Steigungswinkel der Basislinie relativ zur Horizontalen bezeichnet. Sind B und ε bekannt, so lässt sich Gl. 4.1 nach dem Blickwinkel auflösen; die topographische Höhe des Streuers leitet sich dann aus der Höhe h_0 der Position des Masters ab:

$$h = h_0 - r_1 \cos \theta \quad . \quad (4.2)$$

Diese Technik, normalerweise als *Radar-Stereogrammetrie* [224][71] bezeichnet, wurde in der Vergangenheit vor allem im Rahmen extraterrestrischer Radarmissionen eingesetzt [108][109]. Ihr Nachteil ist die relativ ungenaue Bestimmung der Schrägentfernungen durch einen Radarsensor und die damit verbundene niedrige Genauigkeit in der Bestimmung der Streuerposition. Die geringe Entfernungsauflösung (Gl. 2.2), welche typischerweise in der Größenordnung von mehreren Metern liegt, erlaubt nur die Bestimmung eines relativ groben digitalen Oberflächenmodells.

Die SAR Interferometrie verfolgt prinzipiell ein ähnliches Konzept, erzielt aber erheblich höhere Genauigkeiten als die Radar-Stereogrammetrie. Möglich wird dies durch Auswertung der Entfernungsdifferenz $r_1 - r_2$, welche durch ein Phasendifferenzverfahren erheblich genauer als die Schrägentfernungen selber bestimmt werden kann. Nach genauer Koregistrierung der beiden SAR Aufnahmen S_1 und S_2 [62][183] lässt sich ein sogenanntes *SAR Interferogramm* durch Multiplikation der ersten Aufnahme mit dem konjugiert komplexen der zweiten Aufnahme generieren. Es ergibt sich

$$s_1 s_2^* = \varrho_1 \varrho_2^* \exp \left(\frac{2i\omega}{c} (r_1 - r_2) \right) \quad . \quad (4.3)$$

Nimmt man an, dass die komplexe Reflektivität ϱ (vergl Gl. 2.8) winkelunabhängig ist, sich also durch den leicht veränderten Einfallswinkel bei der zweiten Aufnahme nicht ändert, so löschen sich die beiden identischen Phasen der Reflektivität während der Interferogrammgenerierung aus. Die Phase des resultierenden Interferogramms hängt also im Idealfall nur noch von dem Weglängenunterschied $r_1 - r_2$ ab. Da die vom SAR verwendete Wellenlänge im Vergleich zur Entfernungsauflösung zwangsläufig klein ist, lässt sich der Weglängenunterschied wesentlich genauer über eine Phasenmessung bestimmen. Allerdings ist zu beachten, dass die Phasenmessung nur mehrdeutig mit einer Periode von 2π erfolgen kann. Ignoriert man dieses Problem für den Moment, so lässt sich sagen, dass die absolute Phase präzise Informationen über die Weglängendifferenz mit einer Genauigkeit von einem Bruchteil der Radarwellenlänge liefert. Daraus ergibt sich im Vergleich zu der Stereogrammetrie eine stark erhöhte Winkelauflösung bei der Bestimmung von θ .

Unter Verwendung von $r_2 = r_1 + \Delta r_{12}$ lässt sich Gl. 4.1 folgendermaßen umschreiben:

$$B \sin(\theta - \varepsilon) = \Delta r_{12} + \frac{\Delta r_{12}^2}{2r_1} - \frac{B^2}{2r_1} \quad . \quad (4.4)$$

Um Änderungen in der komplexen Reflektivität durch unterschiedliche Einfallswinkel möglichst gering zu halten, wird in der SAR Interferometrie immer eine Basislinie B verwendet, die klein gegenüber der Schrägentfernung ist¹. Der bedeutendste Term in Gl. 4.4 ist daher die Weglängendifferenz Δr_{12} , die beiden hinteren Terme können in vielen Fällen vernachlässigt werden. In diesem Fall lässt sich die interferometrische Phasendifferenz Φ als

$$\Phi = \frac{2\omega}{c} \Delta r_{12} \approx \frac{2\omega}{c} B \sin(\theta - \varepsilon) \quad (4.5)$$

darstellen. Ein imaginärer Streuer ϱ' , der sich in derselben Schrägentfernung, aber einer anderen topographischen Höhe befindet, die sich von der ursprünglichen um Δz unterscheidet, besitzt aufgrund des geringfügig anderen Blickwinkels auch eine andere interferometrische Phase Φ' :

$$\Phi'(\Delta z) = \frac{2\omega}{c} B \sin(\theta + \Delta\theta(\Delta z) - \varepsilon) \quad . \quad (4.6)$$

Unter Verwendung der Näherung $\Delta\theta(\Delta z) \approx \Delta z / (r_1 \sin(\theta))$ ergibt sich als Phasenunterschied zwischen diesen beiden Streuern ein Wert von

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{topo} &= \frac{2\omega}{c} B (\sin(\theta + \Delta\theta(\Delta z) - \varepsilon) - \sin(\theta - \varepsilon)) \\ &\approx \frac{2\omega}{c} B \cos(\theta - \varepsilon) \Delta\theta(\Delta z) \approx \frac{2\omega B \cos(\theta - \varepsilon)}{cr_1 \sin(\theta)} \Delta z \quad . \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ganz ähnlich erzeugt auch ein imaginärer Streuer ϱ'' , der sich in derselben topographischen Höhe, aber einer sich um Δr veränderten Schrägentfernung befindet, eine andere interferometrische Phasendifferenz. Mit der Näherung $\Delta\theta(\Delta r) \approx \Delta r / (r_1 \tan(\theta))$ ergibt sich analog zu Gl. 4.7 eine Phasenverschiebung von

$$\Delta\Phi_{fe} \approx \frac{2\omega}{c} B \cos(\theta - \varepsilon) \Delta\theta(\Delta r) \approx \frac{2\omega B \cos(\theta - \varepsilon)}{cr_1 \tan(\theta)} \Delta r \quad . \quad (4.8)$$

¹ Abhängig von der Entfernungsbandbreite W und Zielentfernung r des Sensors existiert eine kritische Basislinie $B_{krit} = W \lambda r \tan \theta / (c \cos(\theta - \varepsilon))$, über der keine Interferometrie mehr möglich ist [69].

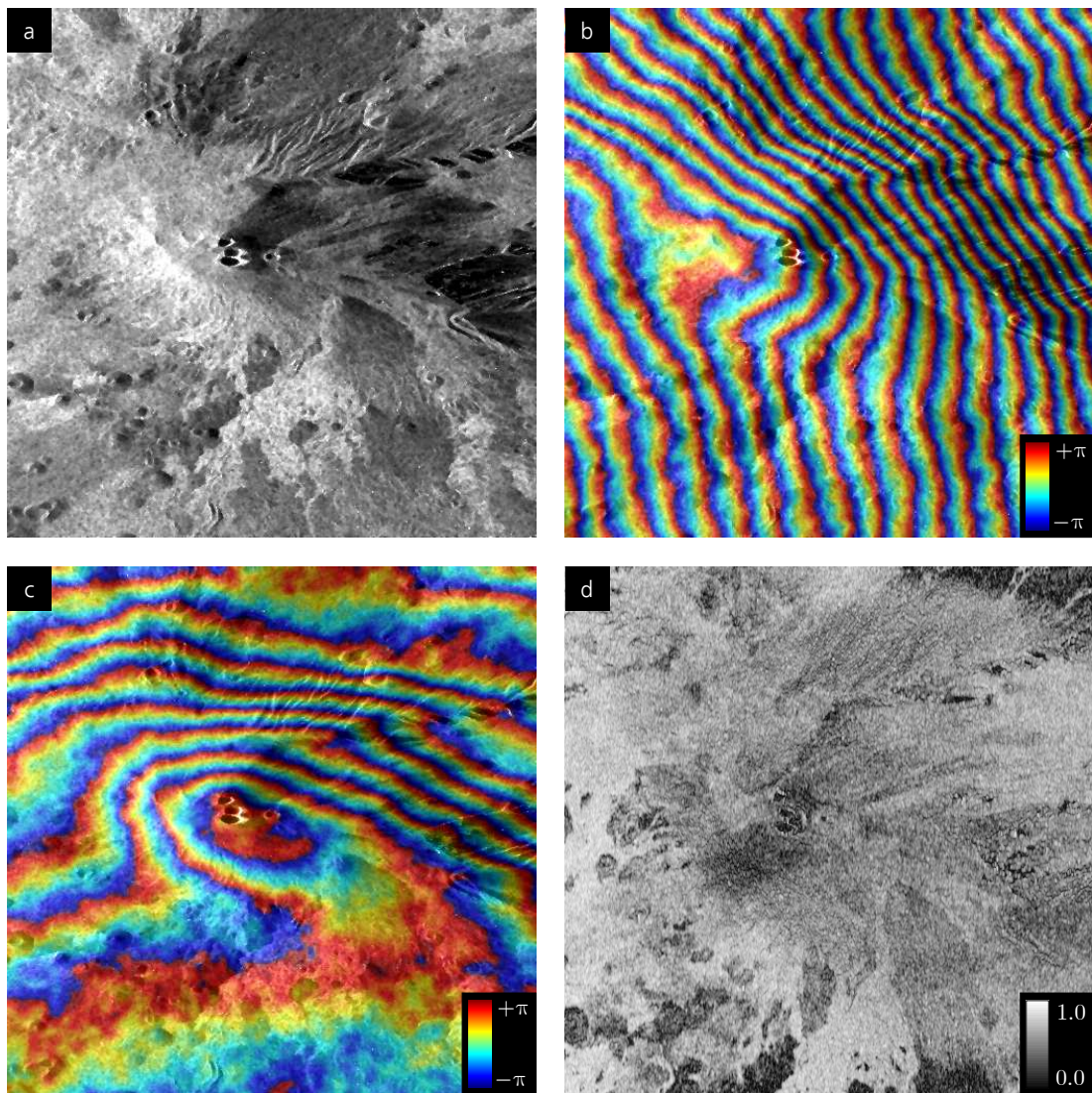


Abbildung 4.2: Der Vulkan Ätna/Sizilien, abgebildet mit dem interferometrischen Repeat-Pass Sensor SIR-C/X-SAR. a) Amplitude des Interferogramms. b) Interferometrische Phase. c) Interferometrische Phase nach Flach-Erde Korrektur. d) Interferometrische Kohärenz

Der lineare Phaseneffekt in Gl. 4.8 wird als *Flache-Erde Phase* bezeichnet und ist ausschließlich in der Aufnahmegeometrie begründet. Da die Schrägentfernungen im Bild gut bekannt sind, lässt sich dieser Term einfach bestimmen und vom eigentlichen SAR Interferogramm subtrahieren; dieser Vorgang nennt sich *Flache-Erde Korrektur*. Es verbleibt der Phasenterm aus Gl. 4.7, welcher einen direkten Bezug zu der Topographie der Szene hat. Beispielsweise kann ein L-Band System mit einer Flughöhe von 4000m und 25m Basislinie bei einer Messgenauigkeit der Phase von 10° die topographische Höhe mit einer Auflösung von 50cm bestimmen. Dies entspricht einer Winkelgenauigkeit in θ von etwa 10^{-4} Grad. Ein Beispiel eines SAR Interferogramms, erzeugt aus Daten eines satellitengestützten Systems, ist in Abb. 4.2 gezeigt.

Die obigen Kleinwinkelnäherungen gelten nur für ein satellitengestütztes System mit hohen Zielentfernungen r und geringen Basislinien. Im Fall flugzeuggestützter Sensoren sind diese

Näherungen im allgemeinen nicht gültig, und es entstehen kompliziertere nichtlineare Gleichungen anstelle von Gl. 4.7 und Gl. 4.8. Die Höhen-Phasen Relation und die Flache-Erde Phase werden dann insbesondere entfernungsabhängig, da sie den Einfallswinkel θ enthalten, welcher stark über die Szene variieren kann.

Bislang wurde vernachlässigt, dass die interferometrische Phase nur mehrdeutig gemessen werden kann. Bevor Gl. 4.7 angewendet werden kann, um die gemessenen interferometrischen Phasen in eine topographische Höhe umzurechnen, ist es nötig, die gemessenen Phasen in absolute Werte ohne Mehrdeutigkeiten umzuwandeln. Ein solcher Verarbeitungsschritt, im allgemeinen als *Unwrapping* bezeichnet, bestimmt für jedes Bildpixel das korrekte Vielfache von 2π , welches zu dem gemessenen Phasenwert addiert werden muss, um den absoluten Wert zu bekommen. Die Fähigkeit, diese unbekannten Vielfachen zu bestimmen, erfordert gewisse Stetigkeitsannahmen bezüglich der Topographie und hängt insgesamt stark von der Datenqualität ab. In der Literatur ist eine große Anzahl von Unwrapping-Algorithmen beschrieben [75][160][38][23]; prinzipbedingt ist jedoch allen gemeinsam, dass sie nicht unter allen Umständen verlässlich arbeiten und eine zufriedenstellende Lösung finden.

Ein wichtiger Faktor in der SAR Interferometrie ist die Qualität des Interferogramms. Im allgemeinen ist die zuvor gemachte Annahme, dass sich die komplexe Reflektivität nicht ändert, ungültig. Dies gilt insbesondere für die Repeat-Pass Interferometrie, da eine hohe zeitliche Stabilität der Streuer oft nicht gegeben ist. SAR Interferogramme erscheinen daher oft verrauscht [223][93][117], was die erzielbare Genauigkeit der Höhenmessung sowie die Qualität des Unwrappings begrenzt. Ein Maß für die Qualität eines Interferogramms ist die normalisierte komplexe Kreuzkorrelation zwischen den beiden SAR Aufnahmen, auch bekannt als *interferometrische Kohärenz* [223]:

$$\gamma := \frac{|E(s_1 s_2^*)|}{\sqrt{E(s_1 s_1^*) E(s_2 s_2^*)}} \quad . \quad (4.9)$$

In der Praxis muss die Bildung des Erwartungswerts $E(\dots)$ in Gl. 4.9 durch eine lokale räumliche Mittelung ersetzt werden, da nur eine einzige Repräsentation von $s_1 s_2^*$ vorhanden ist [197]. Der Betrag der Kohärenz liegt zwischen 0,0 (keine Korrelation) und 1,0, falls beide Bilder genau identisch sind.

Abgesehen von Prozessierungsartefakten gibt es mehrere Faktoren, welche die Kohärenz und damit die Qualität von SAR Interferogrammen begrenzen. Insbesondere zeigen nahezu sämtliche natürliche Oberflächen eine gewisse Abhängigkeit ihrer komplexen Reflektivität von dem Einfallswinkel [69]. Insbesondere im Fall von Volumenstreuern wie Wald ist dies sehr ausgeprägt, und es kommt bereits bei sehr kleinen Basislinien zu vollständiger Dekorrelation. Auch reine Oberflächen zeigen eine gewisse Basisliniendekorrelation, wobei hier der Effekt durch eine spezielle Bandpassfilterung, der sogenannten *Rangefilterung*, vermieden werden kann [69]. Bei der Repeat-Pass Interferometrie tritt außerdem auch temporale Dekorrelation auf, wenn sich die Streuerverteilungen oder die dielektrischen Eigenschaften innerhalb der Bildpixel zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten verändern. Das bedeutet, dass vor allem in kurzwelligen Bändern, wie dem X- und C-Band, bereits leichte Bewegungen in der Vegetation ausreichen, um starke Dekorrelationseffekte hervorzurufen.

4.1.2 Differentielle SAR Interferometrie

Neben der konventionellen SAR Interferometrie, wdie sich hauptsächlich mit der Bestimmung der Geländetopographie beschäftigt, existiert noch eine weitere als *differentielle SAR Interferometrie* bezeichnete Variante, die auf die hochgenaue Messung von Topographieänderungen zielt. Sie erlaubt eine Detektion von minimalsten Oberflächendeformationen auf einer Skala kleiner als der verwendeten Radarwellenlänge, also typischerweise im Millimeter- bis Zentimeterbereich. Diese hohe Genauigkeit erlaubt eine großflächige Beobachtung und Analyse von Effekten wie z.B. koseismischen Deformationsprozessen, Aufblähung von Vulkanen, beginnende Hangrutschungen und Gletscherdynamiken, welche ansonsten bestenfalls mit bodengestützten, lokalen Messungen erfasst werden können [124][73][123][47][36].

Die Aufnahmegeometrie der differentiellen SAR Interferometrie ist prinzipiell identisch mit der der konventionellen SAR Interferometrie und wurde bereits in Abb. 4.1 dargestellt. Bislang wurde davon ausgegangen, dass sich der beobachtete Streuer ϱ zwischen der ersten und der zweiten Aufnahme nicht bewegt hat. Ist dies der Fall, so kommt es zusätzlich zu dem Phasenterm der flachen Erde (Gl. 4.8) und dem der Topographie (Gl. 4.7) zu einem differentiellen Phaseneffekt der Größe

$$\Phi_{diff} = \frac{2\omega}{c} \Delta r_{los} \quad , \quad (4.10)$$

wobei Δr_{los} die Komponente der aufgetretenen Verschiebung in Blickrichtung des Sensors darstellt. Die differentielle Phase ist im Gegensatz zu Φ_{fe} und Φ_{topo} nicht mit dem sehr kleinen Faktor B/r skaliert und hängt nur noch von der Wellenlänge ab: Eine Verschiebung um nur eine halbe Wellenlänge führt bereits zu einem Phaseneffekt von 360° . Damit wird es möglich, Änderungen in der Topographie mit einer erheblich höheren Genauigkeit als die Topographie selbst zu bestimmen.

Ein reales SAR Interferometer misst selbstverständlich nur die Summe aller drei Komponenten

$$\Delta\Phi = \Phi_{fe} + \Phi_{topo} + \Phi_{diff} \quad (4.11)$$

Um Φ_{diff} zu bestimmen, ist es nötig Φ_{fe} und Φ_{topo} von der gemessenen interferometrischen Phase zu subtrahieren. Φ_{fe} ist direkt aus der Aufnahmegeometrie und den Sensorparametern zu bestimmen. Zur Berechnung von Φ_{topo} ist hingegen Kenntnis der Topographie nötig. Hierzu existieren zwei verschiedene Möglichkeiten: Zum einen die Verwendung eines externen Höhenmodells zur Berechnung von Φ_{topo} [123] und zum anderen die Bestimmung von Φ_{topo} mit Hilfe eines zweiten SAR Interferogramms, bei dem die zu untersuchende Bewegung nicht aufgetreten ist [221]. Mit der Verfügbarkeit genauer und hochauflösender globaler Höhenmodelle [213][131] wird heutzutage meist erstere Variante verwendet.

Differentielle SAR Interferometrie ist ein sehr leistungsfähiges Fernerkundungsverfahren, besitzt aber zwei charakteristische Nachteile, die beide in der zwangsläufigen Verwendung eines Repeat-Pass Sensors zur Beobachtungen von zeitlichen Veränderungen begründet sind. Das erste Problem ist das Auftreten von temporaler Dekorrelation. Insbesondere vegetierte Oberflächen dekorrelieren relativ rasch und können dann nicht mehr mit interferometrischen Verfahren analysiert werden. Da die Beobachtung kleinster Deformationsgeschwindigkeiten meist lange Aufnahmeintervalle erfordert, um einen signifikanten differentiellen Phaseneffekt auftreten zu lassen,

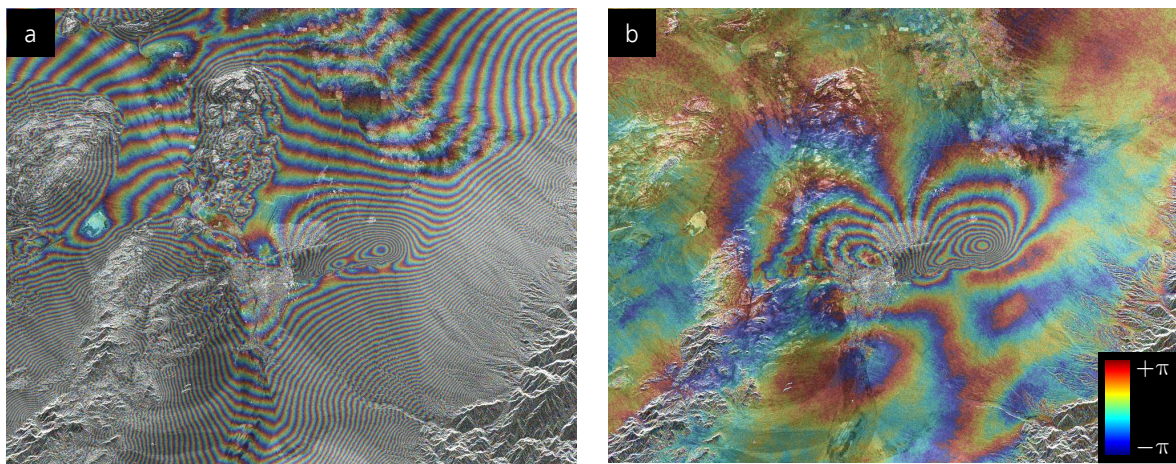


Abbildung 4.3: Abbildung eines Erdbebens mit differentieller Interferometrie. Rechts: Konventionelles Interferogramm nach Flache-Erde-Korrektur (Überlagerung Phase / Amplitude). Links: Differentielles Interferogramm nach Abzug der topographischen Komponente.

entziehen sich viele natürliche Oberflächen einer Beobachtung durch die differentielle SAR Interferometrie. Das zweite Problem ist das Auftreten von atmosphärischen Phasenfehlern, dem sogenannten *atmospheric phase screen* (APS). In der Repeat-Pass Interferometrie ist er in den beiden SAR Aufnahmen unterschiedlich und kürzt sich bei der Interferogrammgenerierung nicht heraus. Es treten daher häufig Phasenfehler in der Größenordnung von mehreren Phasenzyklen auf, die wie Bodendeformationen erscheinen, aber von der Atmosphäre hervorgerufen worden sind [83][212].

Beide angesprochenen Probleme werden im Rahmen der moderneren *Permanent Scatterer Interferometrie* gelöst, bzw. zumindest stark abgemildert [48][107][97]. Dabei wird kein einzelnes Interferogramm, sondern ein größerer Satz von Aufnahme (mindestens ca. 15-20) verwendet, aus denen sich verschiedenste zeitliche und räumlich Basislinien bilden lassen. Basierend auf der Analyse einzelner permanenter Streuer, die sich über alle Aufnahmen hinweg als kohärent erwiesen haben, erfolgt dann über eine statistische Regressionsanalyse eine Bestimmung aller unbekannten Parameter - Höhe des Streuers, mittlere Geschwindigkeit des Streuers und atmosphärischer Fehler - in allen Aufnahmen. Diese nur auf einzelnen Punkten im Bild bestimmten Parameter werden im Anschluss über eine Interpolation auf die nicht analysierten dekorrelierten Bildbereiche ausgebreitet. Das Permanent Scatterer Verfahren ist hochgenau und wird heute insbesondere zur operationellen Beobachtung von Ballungsgebieten [195] sowie zur Früherkennung von Hangrutschungen [140] eingesetzt.

4.2 Flugzeuggestützte SAR Interferometrie

Die in Kapitel 4.1 und 4.1.2 vorgestellten Konzepte lassen sich in der beschriebenen Form nur auf satellitengestützte Sensorsysteme anwenden. Durch die wesentlich geringere Zielentfernung weisen flugzeuggestützte Systeme allgemein eine etwas kompliziertere nichtlineare Aufnahmegeometrie auf, was einige der verwendeten Näherungen ungültig werden lässt. Außerdem besitzen Flugzeuge, anders als Satelliten, eine instabile Flugbahn, welche eine hochgenaue Bewegungs-

komensation während der Datenprozessierung erforderlich macht und auch gewisse Konsequenzen bezüglich der interferometrischen Datenverarbeitung hat [173][156]. In den folgenden Abschnitten sollen daher die wichtigsten in der flugzeuggestützten SAR Interferometrie auftretenden Effekte dargestellt werden.

4.2.1 Effekte von Restbewegungsfehlern

Ein Hauptproblem in der Prozessierung von Daten flugzeuggestützter Sensoren ist die Kompensation der nichtlinearen Eigenbewegung des Flugzeugs. Zu diesem Zweck verwendet man während der Fokussierung der Daten (siehe Kapitel 2.2.3) Bewegungskompensationsalgorithmen, die den Effekt haben sollen, dass das fertig fokussierte Bild in Lage und Phase so erscheint, als sei es von einer virtuellen geradlinigen Trajektorie, dem Referenztrack, aus aufgenommen worden. Im Anschluss können dann herkömmliche interferometrische Algorithmen verwendet werden, welche nicht weiter die an sich nichtlineare Flugbahn berücksichtigen. Es konnte gezeigt werden, dass Bewegungsfehler bis zu mehreren zehn Metern mit modernen Algorithmen problemlos korrigiert werden können [132][164], sofern die aufgetretenen Abweichungen von einer linearen Flugbahn durch Messungen genau bekannt sind.

In der Praxis liegt die Messgenauigkeit aktueller Navigationssysteme bei etwa 5 cm, und es ist auch für die nähere Zukunft mit keiner signifikanten Erhöhung dieser Genauigkeit zu rechnen. Es kommt daher immer zu geringen unbekannten Restbewegungsfehlern, die mangels Kenntnis nicht durch die Bewegungskompensation korrigiert werden können. Für die SAR Fokussierung selbst stellt ein solch geringer Fehler kein Problem dar und resultierende Aufnahmen zeigen nur einen praktisch nicht messbaren Auflösungsverlust. Entscheidender ist der Einfluss von Restbewegungsfehlern auf die Bildphase: Ähnlich wie eine Bodendeformation schlägt sich auch eine falsche Sensorposition direkt, nur mit der Wellenlänge des Sensors skaliert, als eine um

$$\Delta\Phi_{res} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{res} \quad (4.12)$$

verschobene Bildphase nieder, wobei Δr_{res} die Komponente des Restbewegungsfehlers in Blickrichtung des Sensors bezeichnet. Für ein im L-Band arbeitendes SAR Interferometer ($\lambda \simeq 20$ cm) bedeuten daher beispielsweise 5 cm Positionierungsfehler bereits 180° Phasenfehler, bei kürzeren Wellenlängen, wie dem C- und X-Band, sogar noch einen erheblich größeren Fehler.

Zusätzlich zu Phasenfehlern kommt es auch zu geringen Verzerrungen des Bildes [169][159]. Ein in Azimut langsam veränderlicher Restbewegungsfehler kann näherungsweise über die Länge der synthetischen Apertur als linear mit einem Steigungswinkel β angenommen werden. Es kommt dann in Gl. 2.15 zu einer entsprechenden linearen Phasenmodulation, welche nicht durch die Referenzfunktion ausgeglichen wird. Die Phasenhistorie in Azimut beträgt dann

$$\Phi(x) = \frac{2\omega}{c} \left(\frac{(x - x_n)^2}{2r_n} + x \sin \beta \right) \quad (4.13)$$

Nimmt man ohne Beschränkung der Allgemeinheit an, dass das Bild mit einem DOPPLER-Zentroid von Null prozessiert wurde, dann erscheint das Maximum der Impulsantwort an der Stelle, an der das empfangene Signal die DOPPLER-Frequenz Null durchläuft, also wenn die

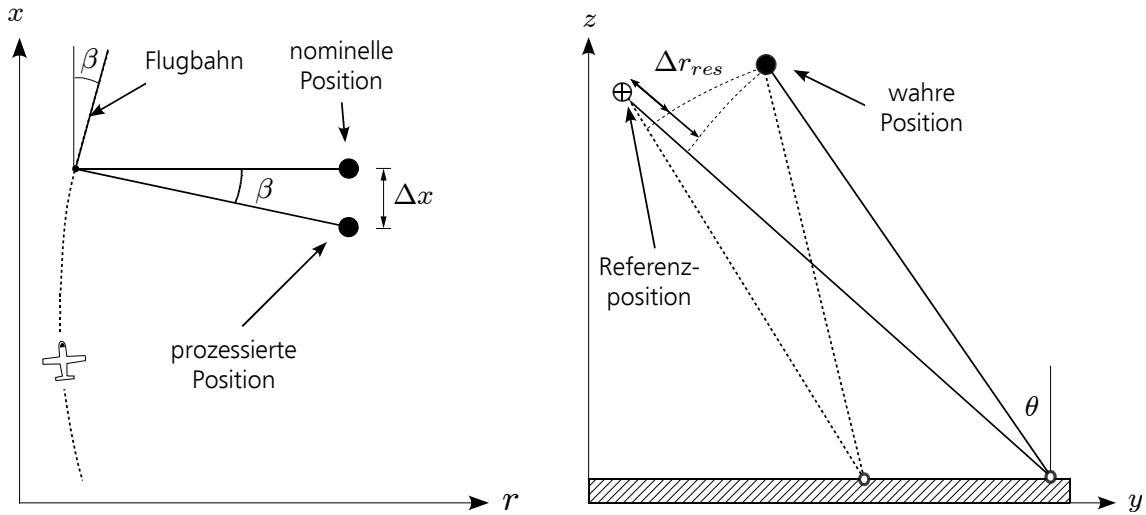


Abbildung 4.4: Links: Fehlerhafte Lokalisation der Impulsantwort durch Restbewegungsfehler. Rechts: Abhängigkeit des effektiven Restbewegungsfehlers von der Entfernung.

Ableitung der Phasenhistorie Null wird:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x) &= \frac{x - x_n}{r_n} + \sin \beta = 0 \\ \Rightarrow x &= x_n - r_n \sin \beta \end{aligned} \quad (4.14)$$

Wie in Abb. 4.4 links illustriert, wird ein Punktziel im Fall eines linearen Restbewegungsfehlers gegenüber dem Ergebnis von Gl. 2.20 um $r_n \sin \beta$ verschoben abgebildet. Da Restbewegungsfehler und damit auch β im allgemeinen sehr klein sind, ist auch die Verzerrung des Bildes minimal. Trotzdem können gewisse Koregistrierungsprobleme durch diesen Effekt auftreten: Ein linearer Restbewegungsfehler von 5 cm über 1 km Flugstrecke verursacht beispielsweise in einem Bild mit 1m Auflösung eine Missregistrierung von 0,25 Pixel bei 5 km Zielentfernung. Abweichungen von der Linearität des Restfehlers innerhalb der Länge der synthetischen Apertur führen zu geringfügigen Auflösungsverlusten in der Impulsantwort, können aber in der Regel vernachlässigt werden.

Beide durch Restbewegungsfehler hervorgerufene Effekte, Phasenfehler und Bildverzerrungen, sind sowohl in Azimut als auch in Entfernung variabel. Die Azimutabhängigkeit ist relativ stark ausgeprägt und erklärt sich durch die Abhängigkeit des Restbewegungsfehlers von der jeweiligen Position des Sensors auf der Trajektorie. Normalerweise treten relativ niederfrequente Schwingungen um die reale Position mit einer Wellenlänge von mehreren hundert Metern und einer Amplitude von wenigen Zentimetern auf, wobei betont werden muss, dass diese Charakteristik stark von dem Navigationssystem selbst abhängen kann. Auch in Entfernungsrichtung kommt es zu deutlichen, wenn auch schwächeren, Variationen der beiden Effekte. Sie rühren von der Änderung des Einfallswinkels zwischen Nah- und Fernbereich her: Wie in Abb. 4.4 rechts illustriert, ändert sich mit dem Einfallswinkel auch die Projektion des Restbewegungsfehlers auf die Blickrichtung des Sensors und mit ihm auch die Ausprägung der durch sie hervorgerufenen Bildstörungen. In Abb. 4.5 wird ein Interferogramm eines flugzeuggestützten Repeat-Pass Sensors mit typischen Bildstörungen gezeigt. Das beobachtete Gelände ist nahezu flach, wodurch

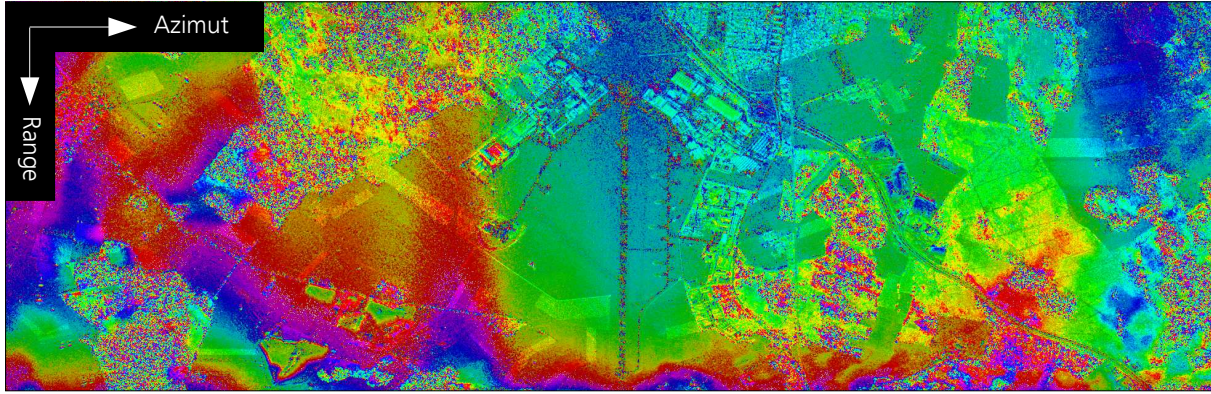


Abbildung 4.5: SAR Interferogramm mit unkompensierten Restbewegungsfehlern.

kaum topographisch bedingte Interferenzeffekte erscheinen sollten. Gut zu erkennen sind hingegen die von Restbewegungsfehler hervorgerufenen Schwingungen in der Bildphase entlang der Azimutrichtung sowie deren leichte Abhängigkeit von der Entfernung.

Für Single-Pass Interferometer stellt das Vorhandensein von Restbewegungsfehlern kein größeres Problem dar, da die Fehler in beiden simultan betriebenen Antennen nahezu identisch sind und sich daher bei der Interferogrammgenerierung herauskürzen. Bei Repeat-Pass Systemen hingegen ist davon auszugehen, dass Master- und Slaveaufnahme völlig unterschiedliche Restbewegungsfehler zeigen. Der im resultierenden Interferogramm auftretende Phasenfehler entspricht der Differenz der Phasenfehler der individuellen Aufnahmen; er besitzt daher eine ähnliche Größenordnung wie die individuellen Fehler der beiden einzelnen Aufnahmen. Für die flugzeuggestützte Repeat-Pass SAR Interferometrie wäre zwar grundsätzlich Millimetergenauigkeit bei der Bestimmung der Sensorflugbahn nötig, was aber kein aktuelles Navigationssystem bieten kann. Um dies zu lösen, wird in Kapitel 4.3.2 eine Prozessierungsstrategie vorgestellt, die es erlaubt, mit hoher Genauigkeit potentielle Restbewegungsfehler aus den Daten selber zu schätzen.

4.2.2 Kopplung zwischen Bewegungsfehlern und Topographie

Ein weiteres Problem bei der Prozessierung von SAR Daten flugzeuggestützter Sensoren ist die Kopplung zwischen Bewegungsfehlern und Topographie. Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, wird im allgemeinen eine zweistufige Bewegungskompensation verwendet, welche präzise den Bewegungsfehler Δr in Blickrichtung des Sensors kompensiert (siehe Gl. 2.27 und Gl. 2.28). Normalerweise wird für die Berechnung von Δr aus den aufgetretenen horizontalen und vertikalen Ablagen Δy und Δz eine Referenzebene in Höhe der mittleren Topographie der Szene verwendet. Mit der damit festgelegten mittleren Flughöhe über Grund h_0 lässt sich die Variation von Δr durch Veränderung des Einfallswinkels θ mit der Entfernung folgendermaßen beschreiben:

$$\Delta r(r) = \sqrt{(h_0 - \Delta z)^2 + \left(\sqrt{r^2 - (h_0 - \Delta z)^2} \pm \Delta y \right)^2} . \quad (4.15)$$

Die Wahl des Vorzeichens ist dabei von der Antennenblickrichtung (links oder rechts) abhängig. Im allgemeinen ist Gl. 4.15 ausreichend für ein gutes Bildergebnis. Tatsächlich aber führen auch

topographische Abweichungen von dieser Referenzhöhe zu Änderungen im Einfallswinkel θ und damit zu einer leicht veränderten Projektionsrichtung bei der Bestimmung von Δr . Wie in Abb. 4.6 links illustriert, ist daher strenggenommen in Gl. 4.15 h_0 durch $h_0 - \Delta h(r)$ zu ersetzen.

Nach der Bewegungskompensation auf eine Referenzhöhe besteht in der Azimutkompression ein Phasenoffset $\epsilon(x, r_n)$ zwischen den Rohdaten und der verwendeten Referenzfunktion $h_{ref}(x, r_n)$. Führt man die Fokussierung wie in Gl. 2.20 durch, so ergibt sich näherungsweise im Maximum der Impulsantwort ein Wert von

$$v_{real}(x_n, r_n) = v(x_n, r_n) \int_{x_n - L_{sa}/2}^{x_n + L_{sa}/2} \exp\left(\frac{2i\omega}{c}\epsilon(x, r_n)\right) dx \quad , \quad (4.16)$$

welcher sich um einen integrativen Phasenterm von der korrekten Impulsantwort unterscheidet. Ist $\epsilon(x, r_n)$ bekannt, so lässt sich dieser Term auf numerisch recht aufwendige Weise prinzipiell bestimmen; wie alle Bewegungsfehler geht er aber auch mit einer geringen geometrischen Verzerrung des Bildes einher.

Eine naheliegende Lösung für das angesprochene Problem wäre während der Bewegungskompensation statt Gl. 4.15 eine um die jeweilige Topographie korrigierte Version zu benutzen, was genaue Kenntnis der Höhen in der Szene voraussetzt. Allerdings stellt dies nur eine sehr rudimentäre Korrektur dar, da des weiteren zu berücksichtigen ist, dass das Rohdatensignal, während der Bildung der synthetischen Apertur, über einen längeren Bereich der Trajektorie integriert wird. An einer bestimmten Azimutposition x liegt zwar eine gegebene Abweichung vom Referenztrack ($\Delta y(x), \Delta z(x)$) vor; diese erfordert aber, je nach gerade prozessierter DOPPLER-Frequenz, eine unterschiedliche Bewegungskompensation, da jede DOPPLER-Frequenz einem anderen Blickwinkel (d.h. Squintwinkel) auf die Szene entspricht. Dieser Effekt ist in Abb. 4.6 rechts, anhand eines Beispiels mit 3 Blickrichtungen, dargestellt. Eine präzise Bewegungskompensation ist somit bei Abweichungen von der verwendeten Referenzhöhe mit den herkömmlichen 2-stufigen Methoden nicht mehr möglich.

Satellitengestützte Sensoren besitzen faktisch keine Bewegungsfehler, zudem sind durch die große Flughöhe eventuelle Abweichungen nicht sehr bedeutend. Bei flugzeuggestützten Sensoren kann es hingegen, aufgrund der niedrigen Flughöhe, zu Fehlern bei der Bestimmung von Δr kommen. Abgesehen von starker alpiner Topographie sind solche Fehler für das reine Bildergebnis zwar zumeist unerheblich, können sich aber in der Bildphase dennoch deutlich niederschlagen und so eine präzise interferometrische Auswertung verhindern. Wie groß die auftretenden Fehler sind, hängt von zwei Faktoren ab. Zum einen führt bei einem gegebenen Bewegungsfehler eine stärkere Abweichung der Topographie von der Referenzhöhe auch zu einem entsprechend größerem Fehler in der Bestimmung von Δr . Zum anderen erhöhen größere Bewegungsfehler bei einer gegebenen topographischen Abweichung den Fehler in der Bestimmung von Δr . Ist einer der beiden Einflüsse Null, tritt kein Bewegungsfehler oder keine topographische Abweichung auf, so kommt es zu keinem zusätzlichen Restfehler. In allen anderen Fällen ist davon auszugehen, dass selbst bei absolut exakter Bestimmung der Sensortrajektorien unkompenzierte Restbewegungsfehler in den Daten verbleiben. Auch wenn die Winkeländerung von θ durch topographische Variationen sehr klein ist, können Restfehler entstehen, die in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die unbestimmten Restbewegungsfehler Δr_{res} aus Abschnitt 4.2.1. In Abb. 4.7 ist dies anhand zweier simulierten Fehlerkurven dargestellt, welche zeigen, dass bei realistischen Werten für Δy und Δh Fehler bis in den Dezimeterbereich hinein auftreten können.

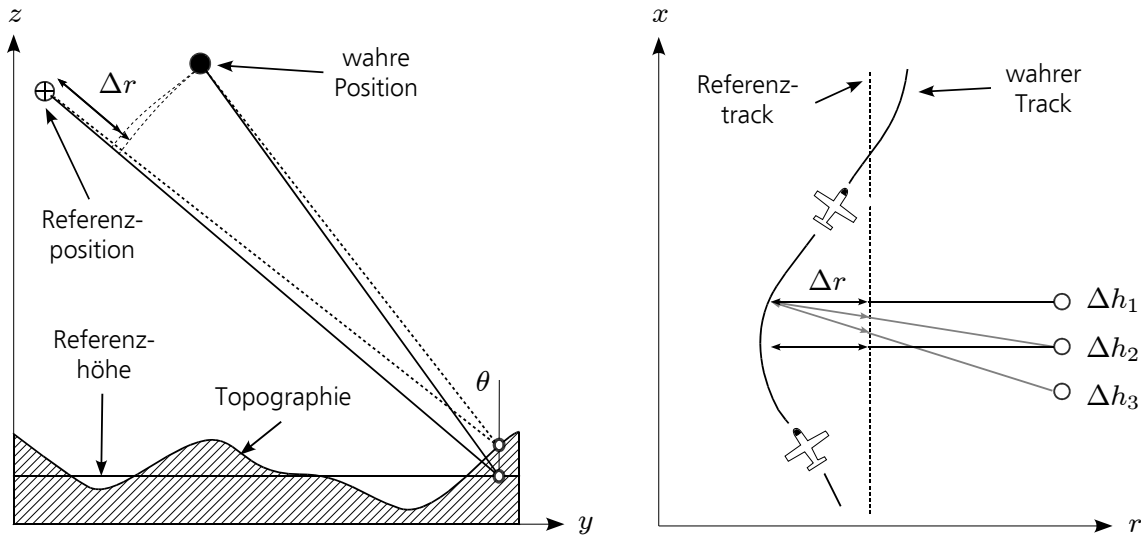


Abbildung 4.6: Links: Variation des Bewegungsfehlers mit der Abweichung der Topographie von der Referenzhöhe. Rechts: Abhängigkeit der Bewegungskompensation vom aktuell prozessierten Squintwinkel.

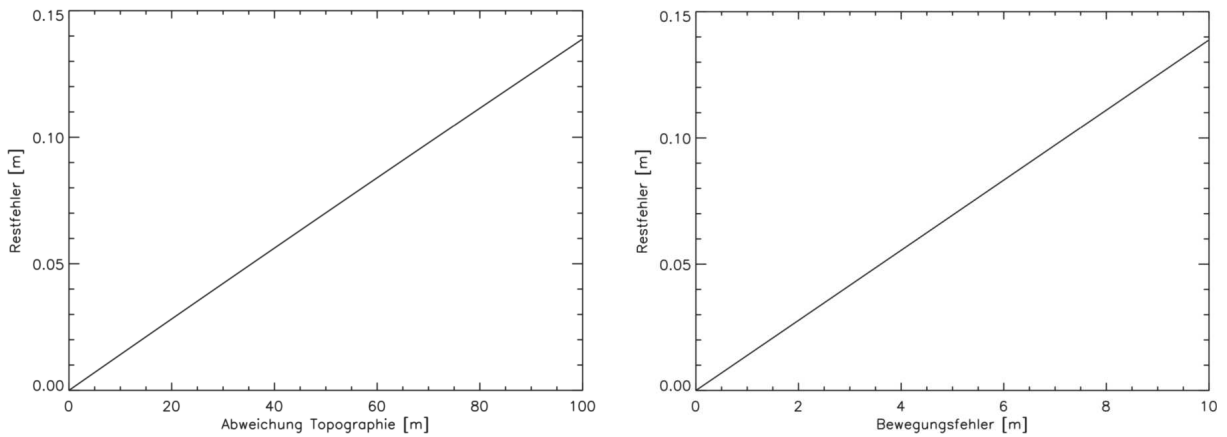


Abbildung 4.7: Restfehler durch topographische Effekte in der Bewegungskompensation. Links: Fehler bei 10m horizontalem Bewegungsfehler und variabler Abweichung von der Referenzhöhe. Rechts: Fehler bei 100m topographischer Abweichung und variablem horizontalem Bewegungsfehler.

Auch die Problematik der topographischen Effekte in der Bewegungskompensation tritt vor allem bei der Repeat-Pass Interferometrie verstärkt hervor, da aufgrund verschiedener Bewegungskompensationen die Phasenfehler beider Aufnahmen voneinander unabhängig sind. Der im Interferogramm beobachtete Phasenfehler entspricht der Differenz der beiden individuellen Fehler und tritt zusätzlich zu den in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Restbewegungsfehlern auf.

4.2.3 Skalierung der Basislinie

Eine bislang noch nicht erwähnte Problematik ist der Zusammenhang zwischen der effektiven interferometrischen Basislinie B und der Bewegungskompensation. Bei einem flugzeuggetragenen Sensor kann nicht von einer geradlinigen Flugbahn ausgegangen werden; es werden stattdessen geradlinige Referenztracks verwendet, auf welche die Bewegungskompensation durchgeführt wird. Diese Referenztracks werden bei interferometrischen Anwendungen gewöhnlicherweise parallel gelegt, um eine konstante Basislinie entlang Azimutrichtung sicherzustellen und eine Verdrehung der Slaveaufnahme gegenüber dem Master zu vermeiden. Trotzdem ist aber für den interferometrischen Effekt der Topographie die reale Basislinie, also die Basislinie zwischen den real aufgetretenen Flugbahnen, verantwortlich.

In Abb. 4.8 wird dies anschaulich anhand der Situation an einer Azimutposition dargestellt. Während der Bewegungskompensation werden durch Anbringen der Phasenkorrektur Δr_{master} die Daten des Mastertracks von der wahren Position auf die Referenzposition korrigiert, gleiches geschieht im Slavetrack durch den Term Δr_{slave} . Zur Berechnung beider Terme wird, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, eine konstante Referenzhöhe angenommen. Ein Interferogramm zwischen den bewegungskompensierten Aufnahmen zeigt an der betreffenden Stelle des Bildes den Phasenterm $\Delta r_{master} + \Delta r_{real} + \Delta r_{slave}$ und damit die zum Abstand der Referenztracks gehörige Phase. Weicht allerdings die Topographie in unbekannter Weise von der Referenzhöhe ab, so ändert sich θ und damit Δr_{real} , nicht aber Δr_{master} und Δr_{slave} . Der durch Gl. 4.7 beschriebene topographische Effekt in der interferometrischen Phase skaliert also ausschließlich mit der realen Basislinie B_{real} und besitzt keinerlei Bezug zur Referenzbasislinie.

Bei satellitengestützten Systemen ist dieser Effekt zu vernachlässigen. Bei der interferometrischen Auswertung von flugzeuggestützten Repeat-Pass Systemen hingegen muss beachtet werden, dass die reale Basislinie entlang Azimutrichtung stark variabel sein kann. Verstärkt wird dieser Effekt weiter durch die bei Flugzeugsensoren häufig erforderlichen kurzen Basislinien von nur wenigen Metern. In einem solchen Fall kommt es durch die Instabilitäten der Flugbahn zwangsläufig zu sehr hohen relativen Schwankungen der Basislinie während der Aufnahme. Im Extremfall kann es sogar zu sich kreuzenden Flugbahnen von Master- und Slaveaufnahme und somit zu Bereichen im Bild ohne effektive interferometrische Basislinie kommen.

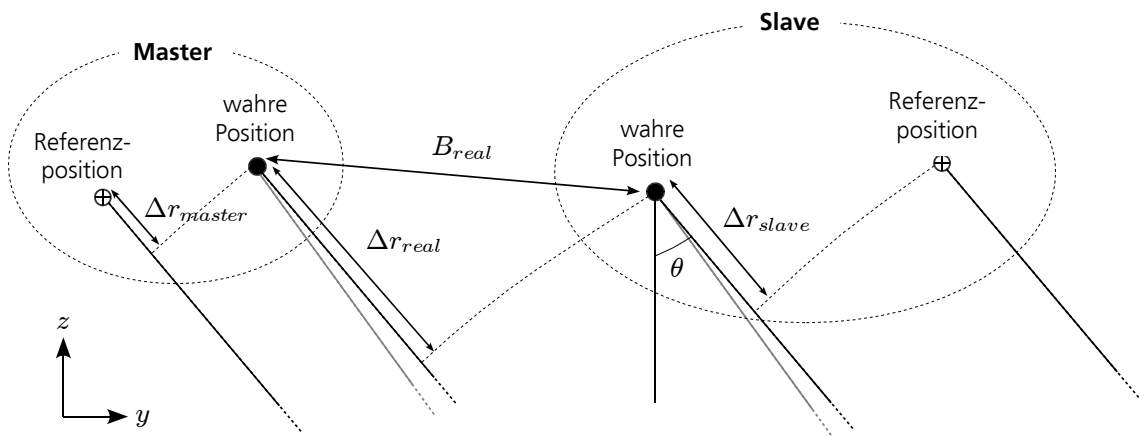


Abbildung 4.8: Zusammenhang zwischen interferometrischer Basislinie und Bewegungskompensationstermen.

4.3 Verbesserte Datenverarbeitung in der flugzeuggestützten SAR Interferometrie

4.3.1 Topographieabhängige Bewegungskompensation

Wie in Kapitel 4.2.2 erläutert, führen Abweichungen der Topographie von der für die Bewegungskompensation verwendeten Referenzhöhe in Repeat-Pass Interferogrammen flugzeuggetragener Sensoren zu signifikanten Phasenfehlern. Es ist daher ein alternativer Ansatz zur Bewegungskompensation nötig, mit dem man adaptiv auf die lokale Topographie reagieren kann.

Ein einfacher Ansatz wäre es, während der Bewegungskompensation statt Gl. 4.15 einen um die Topographie korrigierten Ausdruck zu verwenden (vergl. Kapitel 4.2.2). In der Literatur beschriebene Algorithmen [193] [182] verwenden statt h_0 als bessere Näherung des Fehlers den jeweiligen Topographiewert im Zentrum der prozessierten Apertur. Dieses Vorgehen führt insbesondere bei Aufnahmesystemen mit relativ kurzen synthetischen Aperturen zu verbesserten Ergebnissen. Etwas korrekter wäre die Verwendung der über die Länge der synthetischen Apertur gemittelten topographischen Höhe. Trotzdem würde es auch hier zu Fehlern kommen, wenn sich die Topographie nicht konstant über die Länge der synthetischen Apertur verhält (vergleiche Abb. 4.7 rechts). Da pro Puls nur eine einzige Höhe zur Bewegungskompensation verwendet wird, ist man mit solchen Verfahren grundsätzlich nicht in der Lage, den Variationen der Topographie innerhalb der Antennenkeule zu folgen.

Der im folgenden vorgestellte Zeit-Frequenz-Algorithmus zur vollständigen topographieadaptiven Bewegungskompensation folgt einem ähnlichen Prinzip wie [149], verwendet aber zusätzlich die Topographie unter Berücksichtigung des variierenden Squintwinkels innerhalb der Antennenkeule. Ausgangspunkt sind, wie üblich für die Bewegungskompensation, die SAR Daten nach Entfernungskompression und nach Korrektur der Zielentfernungsänderung. Die Grundlage der Korrektur ist ein Blockprozessierungsansatz, bei dem kleine Datenblöcke in Azimut durch lokale Fouriertransformationen (SFFT) in den Frequenzraum übergeführt werden. Ein einzelner solche Block besitzt sowohl eine räumliche Zuordnung über seine mittlere Position, als auch eine Dopplerfrequenz- bzw. Squintwinkelzuordnung durch die Elemente seiner Fouriertransformierten. Für einen gegebenen Block gilt analog zu Gl. 2.51 als Beziehung zwischen dem Squintwinkel β und der Azimutwellenzahl k_x die Dopplerformel

$$\beta(k_{xi}) = \sin^{-1} \left(\frac{ck_{xi}}{2\omega_0} \right) , \quad (4.17)$$

wobei i den Index des jeweiligen Elements der Fouriertransformierten bezeichnet. Jedes Element entspricht also einer bestimmten Blickrichtung und kann daher, ausgehend von der mittleren Azimutposition des jeweiligen Blocks x_c und seiner nominellen Entfernung r_c , über

$$x_i = x_c + r_c \cdot \tan \beta(k_{xi}) \quad (4.18)$$

mit einer ganz bestimmten Position (x_i, r_c) im Höhenmodell in Verbindung gebracht werden (vergl. Abb. 4.6 rechts). Damit wird eine präzise Bestimmung der Bewegungskompensationsphase möglich. Es ergibt sich innerhalb des betrachteten Blocks eine Restphasenkorrektur von

$$C_3(x_c, r_c, k_{xi}) = \exp \left[\frac{2i\omega_0}{c} \left(\frac{r_c}{\cos \beta(k_{xi})} - r_{real, k_{xi}} - r_{mc} \right) \right] , \quad (4.19)$$

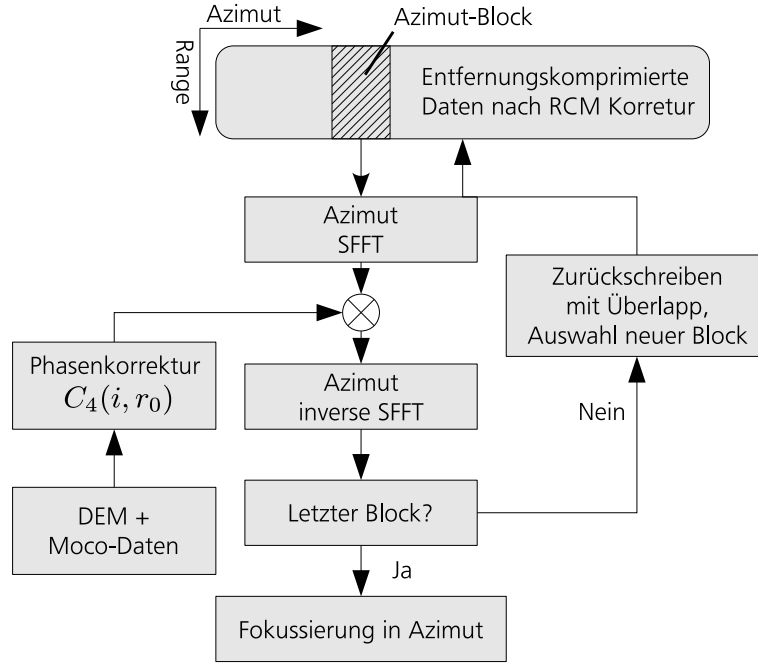


Abbildung 4.9: Blockdiagramm der topographieadaptiven Bewegungskompensation.

wobei $r_{real,k_{xi}}$ die tatsächliche Entfernung unter Berücksichtigung des Höhenmodells und des Squintwinkels $\beta(k_{xi})$ und r_{mc} die bereits für den jeweiligen Datenblock erfolgten Korrekturen während der Bewegungskompensation erster und zweiter Ordnung darstellen. Durch die Division der nominellen Entfernung durch $\cos \beta(k_{xi})$ lässt sich als positiver Nebeneffekt auch eine Squintwinkel-adaptive Bewegungskompensation erzielen (vergl. Gl. 2.51 und [149]). Nach Verarbeitung eines Blocks wird eine inverse SFFT durchgeführt, um wieder in den Zeitbereich zu gelangen und mit dem nächsten Block fortgefahren. Ist die Korrektur auf dem gesamten Bild durchgeführt worden, kann die Azimutfokussierung vorgenommen werden. Ein Blockdiagramm des gesamten Prozesses ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, sollte eine solche Korrektur nach der Bewegungskompensation 2. Ordnung angewendet werden, da an dieser Stelle die SAR Daten entfernungskomprimiert und ohne Zielentfernungsänderung vorliegen. Im Rahmen einer Range-Doppler oder einer Chirp-Scaling Prozessierung muss daher ein entsprechender zusätzlicher Verarbeitungsschritt in die Prozessierungskette eingefügt werden. Bei der in Kapitel 2.3 beschriebenen erweiterten Wellenzahlprozessierung hingegen lässt sich das Verfahren ohne weiteren Mehraufwand direkt in die Bewegungskompensation 3. Ordnung integrieren. Hierzu muss in Gl. 2.49 der erste Δr -Term unter Berücksichtigung der zu r_c , x_c und k_{xi} gehörigen Topographie bestimmt werden.

Aufgrund der blockweisen Verarbeitung der Daten kann es zu unerwünschten Phasensprüngen an den Blockgrenzen kommen, welche nach der Azimutfokussierung deutliche Nebenkeulen in der Impulsantwort hervorrufen. Eine einfache Möglichkeit, um solche Phasensprünge zu minimieren, ist es während der Bewegungskompensation 1. und 2. Ordnung, anstatt einer fixen Referenzhöhe, die mittlere Höhe im von der jeweiligen Antennenkeule erfassten Bereich zu verwenden. Des weiteren sollten sich die Datenblocks im beschriebenen Verfahren deutlich überlappen, um Phasenunterschiede zwischen benachbarten Block langsam ineinander übergehen zu lassen.

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die Zeit-Frequenz Auflösung der SFFTs: Verwendet man eine kleine Blockgröße, so erhält man eine relativ geringe Frequenzauflösung und damit nur eine recht grobe Adaption auf die Topographievariationen innerhalb der Antennenkeule. Benutzt man eine sehr hohe Blockgröße, so kommt es zu einer sehr schlechten zeitlichen Aktualisierung der Korrekturen. In der Praxis ist hier ein Kompromiss zu finden: Treten bei dem verwendeten Sensor hochfrequente Bewegungsfehler auf, so ist eine schnelle zeitliche Aktualisierung der Korrekturen wichtig. Herrschen hingegen schnelle Variationen in der Topographie vor, so ist eine genaue räumliche Adaption auf das Höhenmodell, also große Blöcke, nötig. In der Praxis haben sich für den Fall des E-SARs Blockgrößen um die 50 m als günstig erwiesen. Mit einem ähnlichen Ansatz [42] ist eine genaue Adaption auf Topographie und Bewegungsfehler möglich, allerdings ist ein erheblich höherer Rechenaufwand nötig. In der Praxis besteht eine Einschränkung durch die begrenzte räumliche Auflösung des verwendeten Höhenmodells. Es ist überflüssig, eine bessere räumliche Adaption vorzunehmen, als sie durch die Auflösung des DEMs vorgegeben ist. Ein Vergleich der Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze zur topographieadaptiven Bewegungskompensation findet sich in [152].

Um die Leistungsfähigkeit der beschriebenen Methode zu validieren, wurden interferometrische SAR Daten einer Szene mit starker Topographie mit vier verschiedenen Ansätzen prozessiert:

1. Konventionelle zweistufige Bewegungskompensation mit einer konstanten Referenzhöhe über die gesamte Szene
2. Bewegungskompensation zweiter Ordnung unter Verwendung der mittleren Höhe innerhalb des jeweiligen Antennenfußabdrucks.
3. Bewegungskompensation zweiter Ordnung unter Verwendung der mittleren Höhe innerhalb des jeweiligen Antennenfußabdrucks und anschließender adaptiver Subaperturbewegungskompensation.
4. Zeitbereichsprozessierung, d.h. ideale Wellenfeld-Rückprojektion unter Verwendung der Topographie. Dieses Ergebnis dient als Referenz.

Die betrachtete Szene liegt in den bayerischen Alpen (Bad Feilnbach), weist topografische Höhen zwischen 550 m und 1800 m auf und wurde vom E-SAR im L-Band aufgenommen. Bei dieser Befliegung traten Bewegungsfehler in der Größenordnung von 5-10 Metern auf. Als Höhenmodell wurden SRTM Daten mit einer räumlichen Auflösung von 90 m verwendet, welche durch kubische Faltung auf die Bildauflösung von etwa 1 m interpoliert wurden. Für die beschriebene Subaperturbewegungskompensation wurde eine Blockgröße von 64 Pixeln in Azimut und ein Überlapp zwischen den Blöcken von 50% verwendet. Eine explizite Koregistrierung der interferometrischen Paare wurde nicht durchgeführt, um Bildverzerrungen durch fehlerhafte Bewegungskompensation deutlich hervortreten zu lassen; nur bekannte, direkt aus der Aufnahmegeometrie abzuleitende Bildverzerrungen wurden korrigiert.

Abb. 4.10 zeigt verschiedene Ergebnisse dieses Vergleichs. Die mit Methode 3 bestimmte Bildamplitude, zu finden in Abb. 4.10a, erscheint gut fokussiert und zeigt keine sichtbaren durch die Blockverarbeitung verursachten Artefakte. Die mit einer konventionellen Prozessierung erzielte Kohärenzkarte (Abb. 4.10b) weist mehrere völlig dekorrelierte Bereiche auf. Diese stammen von Koregistrierungsfehlern, welche von durch die Topographie induzierten Fehlern in der Bewegungskompensation herrühren. Mit korrelationsbasierten Koregistrierungsverfahren lässt sich

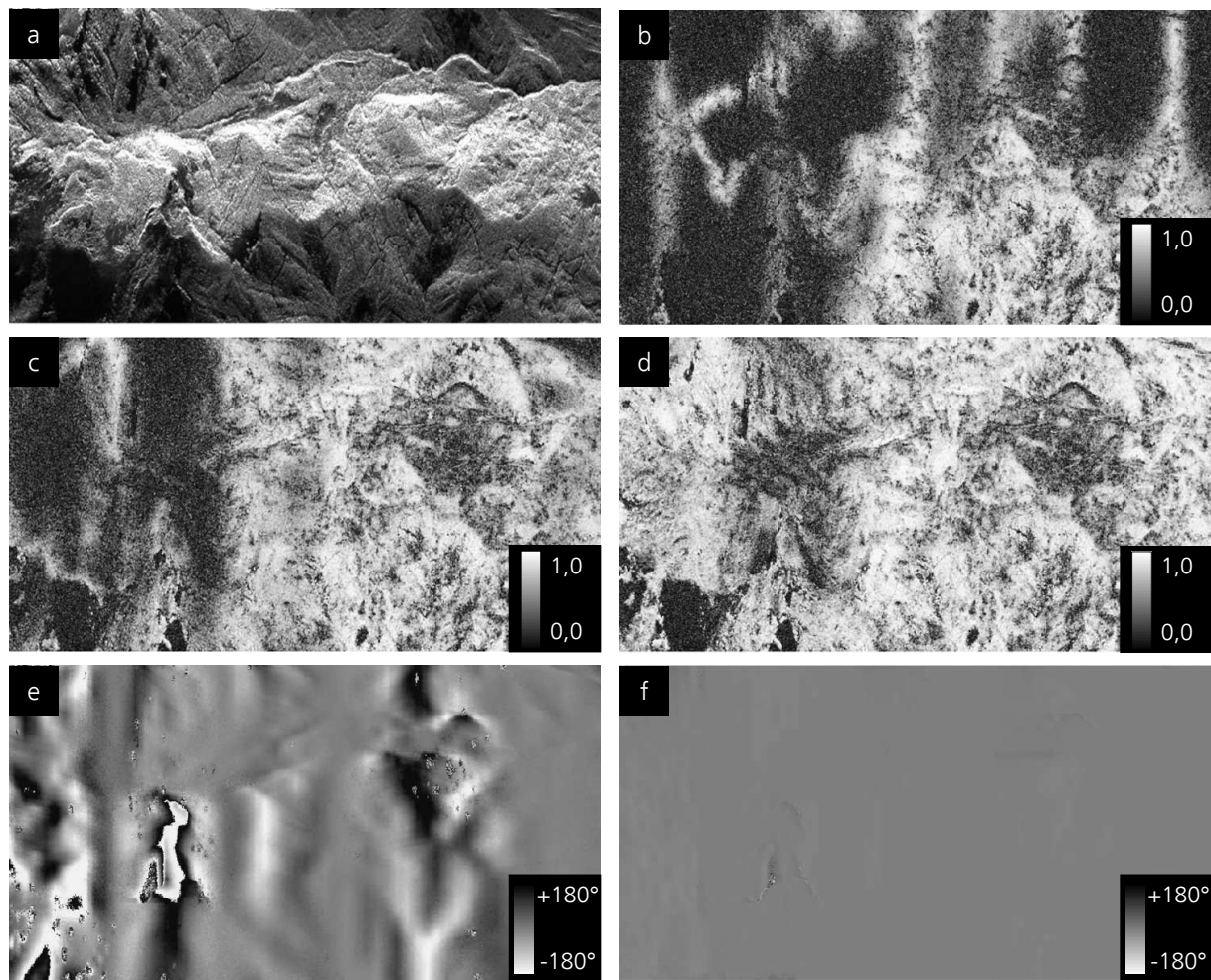


Abbildung 4.10: Topographieadaptive Bewegungskompensation. a) Bildamplitude. b) Kohärenz bei Bewegungskompensation auf Referenzebene. c) Kohärenz bei Bewegungskompensation auf mittlere Topographie des Pulses. d) Kohärenz bei Anwendung von voller topographieadaptiver Bewegungskompensation. e) Phasendifferenz der Slaveaufnahme zu Zeitbereichsergebnis bei Bewegungskompensation auf mittlere Topographie des Pulses. f) Phasendifferenz der Slaveaufnahme zu Zeitbereichsergebnis bei voller topographieadaptiver Bewegungskompensation.

zwar auch in diesen Bereichen eine gewisse Kohärenz erzielen, assoziierte Phasenfehler und Defokussierungseffekte würden aber in den Daten verbleiben. Zu einer deutlichen Verbesserung kommt es bei Verwendung der Topographie in der Bewegungskompensation 2. Ordnung (Methode 2, Abb. 4.10c). Die Anzahl und Größe der dekorrelierten Flächen werden kleiner, trotzdem verbleiben vor allem am linken Bildrand immer noch einige verzerrte Bildbereiche. Erst bei Verwendung der adaptiven Bewegungskompensation (Abb. 4.10d) verschwinden auch sie, und es kann über das gesamte Bild hinweg eine gute Kohärenz erzielt werden. Die verbliebenen, leicht dekorrelierten Bereiche sind auf temporale und Volumendekorrelation zurückzuführen; sie entsprechen den Flächen in der Szene mit dichtem Waldbestand.

Abb. 4.10e und 4.10f zeigen den Phasenunterschied zwischen der zweiten (Slave-) Aufnahme, prozessiert mit Verfahren 2 und 3, und der zweiten Aufnahme, prozessiert mit einem Zeitbe-

reichsverfahren, welches als ideales Ergebnis angesehen werden kann. In beiden Fällen wurde eine zusätzlich Koregistrierung verwendet. Gut zu erkennen sind die starken, von der Kopplung von Bewegungsfehlern mit der Topographie herrührenden Phasenfehler, welche trotz Verwendung der Topographie in der Bewegungskompensation 2. Ordnung auftreten (Abb. 4.10e). Führt man zusätzlich die adaptive Bewegungskompensation 3. Ordnung durch, so treten nur noch minimale Phasenfehler auf. Ihre Standardabweichung liegt in diesem Fall unter 3° ; sie begründen sich in der begrenzten Zeit-Frequenzauflösung des beschriebenen Verfahrens.

Der beschriebene Algorithmus ist also in der Lage, starke topographische Variationen während der Bewegungskompensation zu berücksichtigen und so phasengenaue und geometrisch korrekte SAR Aufnahmen zu generieren. Voraussetzung ist das Vorhandensein eines passenden DEMs. Seit der Verfügbarkeit des globalen SRTM Höhenmodells, dessen Genauigkeit für viele Anwendungen ausreichend ist, ist dies meist gegeben. Die experimentellen Ergebnisse in Abb. 4.10e und 4.10f zeigen des weiteren, dass für genaue flugzeuggestützte Repeat-Pass SAR Interferometrie eine topographieadaptive Bewegungskompensation unbedingt nötig ist.

Im vorliegenden Fall wurde der Algorithmus direkt vor der Azimutkompression eingefügt. Statt in den eigentlichen SAR Prozessor einzugreifen, lässt sich das Verfahren alternativ auch als Postprozessierungsschritt implementieren. Dies erfordert einen Dekompressionsschritt in Azimut [165] vor Anwendung von Gl. 4.19.

4.3.2 Schätzung der Basislinienfehler

In Kapitel 4.2.1 wurde dargestellt, wie die vom Navigationssystem des Sensors nicht erfassten Bewegungsfehler das interferometrische Messergebnis verfälschen können. Da die aufgetretenen, typischerweise sehr kleinen Restbewegungsfehler unbekannt sind, besteht die einzige Lösungsmöglichkeit für dieses Problem in einer Schätzung des Fehlers aus den Bilddaten selber. Aus der Literatur sind verschiedene sogenannte *Autofokus*-Verfahren zur Bewegungsschätzung bekannt [211][134][59][201]. Ihr Ziel ist es eine völlig unbekannte Sensorbewegung zu schätzen und so auch ohne Navigationssystem ein gutes Bildergebnis zu erzielen. Ihre Genauigkeit ist zwar hoch, aber für den hier vorliegenden Fall, in dem es um die Schätzung von Restbewegungsfehlern im Millimeter- bis Zentimeterbereich geht, häufig nicht ausreichend. Außerdem erfordern hochgenaue Autofokusverfahren das Vorhandensein dominanter Streuer (z.B. Winkelreflektoren) in der Szene, um deren Phasenhistorie mit dem Ziel der Bewegungsschätzung auswerten zu können. Generell kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass solche Streuer verfügbar sind. Im folgenden wird ein interferometrisches Verfahren zur Schätzung von Restbewegungsfehlern beschrieben, welches den differentiellen Restbewegungsfehler in einem interferometrischen Bildpaar bestimmt. Dies ist ausreichend für die Korrektur der Phasenfehler und Bildverzerrungen in interferometrischen Repeat-Pass Aufnahmen flugzeuggestützter Sensoren.

Multisquint-Prozessierung

Ein vollaufgelöstes SAR Bild S besteht aus Signalbeiträgen, die unter Squintwinkeln bzw. mit Dopplerfrequenzen eines bestimmten Bereiches empfangen wurden, definiert durch die Länge der prozessierten synthetischen Apertur, wobei im Folgenden ohne Einschränkung der Allgemeinheit ein mittlerer Squintwinkel von Null angenommen wird. Aus dem vollaufgelösten Bild mit der Azimutbandbreite $W_{Doppler}$ lassen sich, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, mehrere Subaperturaufnahmen bilden, jeweils mit verringerter Bandbreite und unterschiedlichem mittleren

Squintwinkel. Wichtig an dieser Stelle ist der Effekt von Bewegungsfehlern in den individuellen Subaperturen: Solange die Bildprozessierung jeweils in Doppler-Null Geometrie ($\beta = 0$) vorgenommen wurde, erscheint die eigentliche Bildinformation in allen Subaperturbildern an der gleichen Stelle. Restbewegungsfehler, und die damit zusammenhängenden Phasen- und Lokalisierungsfehler, sind hingegen nicht identisch, da eine Subapertur zur Prozessierung verwendet wurde, welche in Azimut um

$$\Delta x_i = r \tan \beta_i \quad (4.20)$$

relativ zu $\beta = 0$ verschoben ist, wobei β_i den mittleren Squintwinkel der i -ten Subapertur bezeichnet. Dadurch werden, wie in Abb. 4.11 links dargestellt, durch jede Subapertur unterschiedliche Abschnitte der Restbewegungsfehler auf eine gegebene Position in der SAR-Szene abgebildet: Von Position A aus wirken sich im betrachteten Bildausschnitt, hier prozessiert mit Squintwinkel Null, die Bewegungsfehler an der Position A aus. Prozessiert man stattdessen den Abschnitt B der Rohdaten mit einem vorwärtgerichteten Squintwinkel, so wirkt sich an der gleichen Stelle des Bildes stattdessen der Bewegungsfehler an der Position B aus.

Eine Möglichkeit unbekannte Restbewegungsfehler zu bestimmen ist es daher, eine SAR Aufnahme mit zwei verschiedenen Squintwinkeln zu prozessieren, bzw. zwei Subaperturen zu erzeugen. Die Phasendifferenz zwischen diesen beiden Aufnahmen entspricht dann der Differenz der beiden Restbewegungsfehler, also ihrer Ableitung in Azimut; eine Integration würde auf den eigentlichen Fehler schließen lassen. In der Praxis funktioniert dieser Ansatz allerdings nur für Punktziele, bei Flächenzielen kommt es zu Dekorrelationseffekten, da unkorrelierte Bereiche des Reflektivitätsspektrums betrachtet werden. Mit Hilfe der Interferometrie lässt sich dieses Problem jedoch umgehen: Die Bildung von Interferogrammen eliminiert den Einfluss der zufälligen Phase der komplexen Reflektivität; Subaperturinterferogramme können daher problemlos miteinander kombiniert werden. Selbstverständlich kann bei einem solchen Vorgehen nicht mehr der Restbewegungsfehler in den einzelnen Tracks, sondern nur noch der azimutabhängige Basislinienfehler, also die Differenz der beiden individuellen Fehler bestimmt werden. Dies ist für interferometrische Auswertungen ausreichend, da so die im Interferogramm durch Restbewegungsfehler auftretenden Phaseneffekte eliminiert werden.

Für eine interferometrische Schätzung des Basislinienfehlers teilt man beide Bilder eines interferometrischen Paares in zwei Subaperturen mit jeweils positiven und negativen DOPPLER-Frequenzen auf und bildet das differentielle Interferogramm zwischen den beiden Subapertur-Interferogrammen [183]. Eine Schätzung der Ableitung des Basislinienfehlers E kann dann durch

$$\frac{\partial}{\partial x} E = \frac{v_0}{2\pi r \Delta f} \arg \{ (s_1^1 s_1^{2*}) (s_2^1 s_2^{2*})^* \} \quad (4.21)$$

erzielt werden [122][163], wobei v_0 die Vorwärtsgeschwindigkeit des Sensors, Δf die spektrale Separation der Subaperturen sowie s_1^1 und s_1^2 die Subapertur 1 von Bild 1 und 2, und s_2^1 und s_2^2 die Subapertur 2 von Bild 1 und 2 bezeichnet. Genaugenommen kann es in Gl. 4.21 zu weiteren Phasenkomponenten kommen, die nicht mit dem Basislinienfehler zusammenhängen. Insbesondere Geschwindigkeitsfehler oder starke Terraindeformationen zwischen den Aufnahmen rufen ebenfalls azimutale Phaseneffekte hervor. Sie sind aber in aller Regel klein und können vernachlässigt werden. Die Kopplung zwischen Topographie und Bewegungsfehlern ist hingegen bedeutsam und muss, vor Anwendung von Gl. 4.21, durch ein Verfahren wie in Kapitel 4.3.1 kompensiert werden.

Ein großes Problem dieser Vorgehensweise ist jedoch das Auftreten von dekorrelierten Regionen, in denen keine Bestimmung der Ableitung möglich ist[169]. Um den Einfluss solcher Regionen zu verringern, kann man mehr als nur zwei Subaperturen mit entsprechend kleinerer Bandbreite verwenden. Teilt man die Bilder in K Subaperturen mit Bandbreite W_{sub} , die sich jeweils um Δf_{sub} in ihrem DOPPLER-Zentroid unterscheiden, so lassen sich insgesamt $K - 1$ differentielle Phasen Φ_i zwischen den Subaperturen $S_i^{1,2}$ und $S_{i+1}^{1,2}$ bilden:

$$\Phi_i = \arg \{ (S_i^1 S_i^{2*}) (S_{i+1}^1 S_{i+1}^{2*})^* \} \quad (4.22)$$

Alle Φ_i sind gleichermaßen proportional zu der Ableitung des Basislinienfehlers, besitzen aber durch die geringere spektrale Separation der Subaperturen eine niedrigere Genauigkeit als die Schätzung in Gl. 4.21². Außerdem erscheint Φ_i in Azimut um $r \tan \beta_{i,i+1}$ gegenüber der Lösung in DOPPLER-Null Geometrie verschoben, wobei $\beta_{i,i+1} = (\beta_i + \beta_{i+1})/2$. Bildet man nun ein gewichtetes Mittel über alle verfügbaren Φ_i , so erhält man eine gegenüber Gl. 4.21 verbesserte Lösung:

$$\frac{\partial}{\partial x} E = \frac{v_0}{2\pi r \Delta f_{sub}} \arg \left\{ \sum_{i=1}^{K-1} \mathcal{G}_i (|\gamma_i| \exp(i\Phi_i)) \right\} \quad (4.23)$$

wobei $\mathcal{G}_i(\dots)$ die Verschiebungsoperation in Azimut um $r \tan \beta_{i,i+1}$ bezeichnet, die nötig ist, um die einzelnen Φ_i in Deckung zu bringen. $|\gamma_i|$ bezeichnet den Absolutwert der komplexen interferometrischen Kohärenz von Φ_i . Der Ansatz in Gl. 4.23 ermöglicht es, den negativen Einfluss dekorrelierter Gebiete zu verringern. Wie in Abb. 4.11 rechts illustriert, ist der Restbewegungsfehler an einer bestimmten Azimutposition in mehreren Subaperturen enthalten. Jede von ihnen projiziert den Fehler auf andere Stellen im Bild, die möglicherweise unterschiedliche Korrelationsgrade besitzen. Durch Nutzen von Informationen aus anderen Squintwinkeln mit höherer Kohärenz kann also auch in einem eigentlich dekorrelierten Abschnitt des Bildes der Restbewegungsfehler bestimmt werden, zumindest solange sich innerhalb der gesamten Länge der synthetischen Apertur wenigstens eine kohärente Region befindet. In Abb. 4.12 ist dieser Effekt dargestellt: Regionen, die in der ersten Subapertur $\mathcal{G}_1(\dots)$ noch dekorreliert erscheinen, werden mit Einbeziehung neuer $\mathcal{G}_i(\dots)$ zunehmend verkleinert.

Eine ausreichend hohe spektrale Separation der Subaperturen ist wichtig, um eine hohe Empfindlichkeit auf Restbewegungsfehler zu erhalten [183], wohingegen eine geringe Bandbreite der Subaperturen eine bessere Bestimmung hochfrequenter Fehler erlaubt [154]. Die optimale Wahl der Bandbreite der Subaperturen sowie deren Separation in Gl. 4.23 hängt sowohl von der Kohärenz, der Stärke der Bewegungsfehler und deren Charakteristika ab und konnte noch nicht statistisch explizit bestimmt werden. Empirisch haben sich 5 bis 7 nichtüberlappende Subaperturen als ein guter Kompromiss herausgestellt.

Modellbasierte Integration

Das Ergebnis von Gl. 4.23 stellt die azimutale Ableitung des zeitabhängigen Basislinienfehlers E , projiziert auf die Blickrichtung des Sensors (line of sight, LOS), dar. Abgesehen von Azimut

²Phasenmehrdeutigkeiten lassen sich hier auch bei starken Restbewegungsfehlern durch Wahl einer entsprechend kleinen spektralen Separation vermeiden [183].

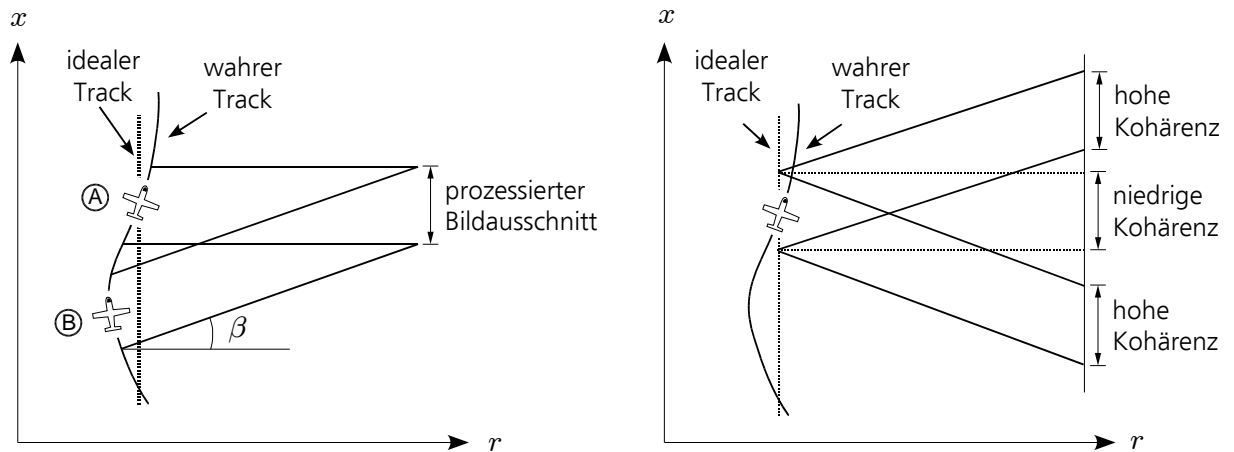


Abbildung 4.11: Links: Abbildung von verschiedenen Abschnitten des Restbewegungsfehlers auf einen gegebenen Teil der Szene durch Subapertur-Prozessierung. Rechts: Verbesserte Multisquint-Prozessierung; der Basislinienfehler an einer niederkohärenten Azimutposition kann aus umliegenden, kohärenteren Bereichen bestimmt werden.

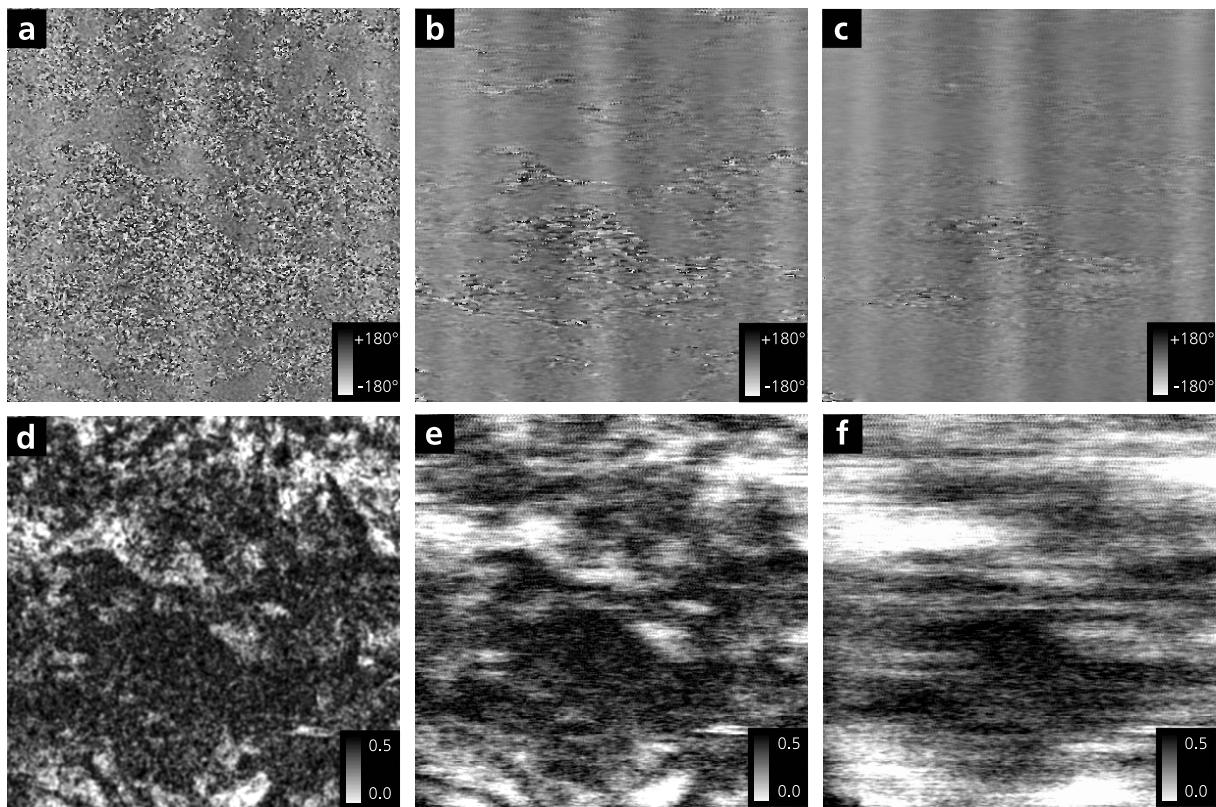


Abbildung 4.12: Vergrößerung kohärenter Regionen durch Multisquint-Prozessierung. a) $\partial E/\partial x$ nach Verarbeitung der ersten Subapertur, b) nach 1/3 der Subaperturen, c) Endergebnis. d) - f) zu Ergebnissen der oberen Zeile gehörigen Gewichtungen W (Standardabweichung der differentiellen Phase)

variiert E auch mit der Entfernung, da sich die LOS Richtung mit dem Einfallswinkel vom Nah- zum Fernbereich ändert. Um den Basislinienfehler selber zu erhalten, ist es nötig, in jeder Entfernungszeile $\partial E/\partial x$ in Azimutrichtung zu integrieren [163][155]. Diese Integration ist ein kritischer Verarbeitungsschritt, insbesondere da meist in gewissen Entfernungen dekorrelierte Bereiche vorkommen, die sich nicht korrekt integrieren lassen. Wie zuvor gezeigt wurde, lässt sich der Einfluss kleinerer dekorrelierter Bereiche durch die Multisquintprozessierung eliminieren. Im allgemeinen kann aber nicht erwartet werden, dass alle dekorrelierten Regionen in allen Entfernungszeilen komplett ausgeblendet werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn niedrigkohärente interferometrische Bildpaare analysiert werden sollen.

In einem solchen Fall ist die Verwendung einer robusten modellbasierten Integration sinnvoll. Die Ableitung des Basislinienfehlers in LOS Richtung kann für eine gegebene Azimutposition in dem Entfernungselement n aus der Ableitung in horizontaler Richtung $\partial E_y/\partial x$ und der Ableitung in vertikaler Richtung $\partial E_z/\partial x$ bestimmt werden³

$$\frac{\partial}{\partial x} E_n = \frac{\partial}{\partial x} E_z \cos \theta_n \pm \frac{\partial}{\partial x} E_y \sin \theta_n \quad , \quad (4.24)$$

wobei θ_n den lokalen Einfallswinkel bezeichnet, der mit Hilfe eines externen DEM bestimmt werden kann. Da der Einfallswinkel θ_n für alle N Entfernungswerte bekannt ist, hängt der Basislinienfehler in LOS Richtung nur noch von 2 freien Parametern ab, $\partial E_y/\partial x$ und $\partial E_z/\partial x$. Damit können die nötigen Parameter prinzipiell aus nur zwei kohärenten Pixeln innerhalb einer Entfernungszeile bestimmt werden. Sind für jede Azimutposition $\partial E_y/\partial x$ und $\partial E_z/\partial x$ bekannt, so kann man beide einzeln über Azimut integrieren und von dem Ergebnis E in LOS Richtung für die gesamte Szene ableiten, d.h. auch in dekorrelierten Regionen.

In den meisten Fällen wird das Problem der Bestimmung von $\partial E_y/\partial x$ und $\partial E_z/\partial x$ stark überbestimmt sein, da es sehr wahrscheinlich mehr als 2 kohärente Pixel in einer Entfernungszeile geben wird. Dies gilt vor allem dann, wenn das Multisquintverfahren eingesetzt wurde, welches die Ausdehnung kohärenter Regionen vergrößert. Im überbestimmten Fall lässt sich aus dem Vektor aller Messwerte der Ableitung in LOS Richtung einer Entfernungszeile $e_{los} = [\partial E_1/\partial x, \dots, \partial E_N/\partial x]$ eine verbesserte Lösung mit der Methode der kleinsten Quadrate (LS) bestimmen:

$$e_{yz} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T e_{los} \quad \text{mit} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \pm \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \pm \sin \theta_N & \cos \theta_N \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad e_{yz} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_y}{\partial x} \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{bmatrix} \quad . \quad (4.25)$$

Gl. 4.25 unterscheidet nicht zwischen hoch- und niedrigkohärenten Pixeln. Um dies zu erreichen kann stattdessen eine gewichtete kleinste Quadrate Methode (WLS) eingesetzt werden:

$$e_{yz} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} e_{los} \quad (4.26)$$

\mathbf{W} bezeichnet dabei eine $N \times N$ Gewichtungsmatrix, welche im Fall von unkorreliertem Rauschen die Form

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{1/\sigma_1^2, 1/\sigma_2^2, \dots, 1/\sigma_N^2\} \quad (4.27)$$

³Das Vorzeichen in Gl. 4.24 hängt von der Blickrichtung des Sensors ab (links oder rechts)

besitzt [187], wobei σ_n die Standardabweichung des Signals im Entfernungselement n entspricht. Sinnvolle Werte für σ_n lassen sich direkt aus der interferometrischen Kohärenz ableiten[178]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1 - |\gamma|^2}{2n_\gamma |\gamma|^2}} \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{K-1} \gamma_i \quad (4.28)$$

n_γ bezeichnet die Anzahl der für die Bildung der Kohärenz verwendeten Looks. Für die Bestimmung der Standardabweichung kommt hier der Mittelwert γ der individuellen komplexen Subapertur-Kohärenzen zum Einsatz. Dies stellt sicher, dass die vergrößerten kohärenten Bereiche korrekt berücksichtigt werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, einen Kohärenzschwellwert zu definieren (z.B. 0.2), unterhalb dem $1/\sigma^2$ auf Null gesetzt wird.

Das Ergebnis der Invertierung in Gl. 4.26 sind robust bestimmte Werte für $\partial E_y/\partial x$ und $\partial E_z/\partial x$. Von nur wenigen kohärenten Pixeln kann eine Invertierung für die gesamte Szene vorgenommen werden: Für jede Azimutposition sind nur zwei kohärente Pixel mit unterschiedlichem Einfallswinkel nötig, mit dem Vorteil, dass vor der Invertierung kohärente Information durch die Multisquintprozessierung über die Länge der synthetischen Apertur verteilt wurde. Treten Azimutpositionen mit weniger als zwei nutzbaren Pixeln auf, so ist eine Interpolation vor der Azimutintegration nötig.

Konstante und lineare Basislinienfehler

Ein verbleibendes Problem bei der Integration von ∂E_y und ∂E_z sind die unbekannten Integrationskonstanten. Sie entsprechen einem unbekannten konstanten Basislinienfehler, der mit den beschriebenen Methoden prinzipiell nicht erfasst werden kann. Sein Haupteffekt in einem SAR Interferogramm wäre ein Interferenzmuster, das einer leichten flachen-Erde-Komponente entspräche. Ein weiteres Problem ist die Bestimmung linearer Basislinienfehler: Tritt eine kleine globale Missregistrierung in Azimut zwischen den Bildern auf, so weist die Schätzung in Gl. 4.23 einen systematischen Fehler in Form eines konstanten Offsets auf, der nicht von einem Basislinienfehler verursacht wurde. Nach der Integration erscheint dann im Ergebnis ein linearer Basislinienfehler, was sich im Interferogramm als ein lineares Phasenmuster in Azimut äußern würde. Es ist daher nötig, vor der Integration von $\partial E_y/\partial x$ und $\partial E_z/\partial x$ ihren jeweiligen Mittelwert zu subtrahieren und den linearen Basislinienfehler als unbekannt anzunehmen.

Da sich sowohl konstante wie lineare Fehler nicht zuverlässig aus den Daten bestimmen lassen, ist ein alternativer Ansatz erforderlich. Eine einfache Möglichkeit ist die Verwendung eines externen digitalen Höhenmodells, wie es z.B. im Rahmen der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) generiert wurde. Von einem solchen Höhenmodell lassen sich, mit Kenntnis der Aufnahmegeometrie, synthetische Interferenzmuster ableiten, die sich im Anschluss mit den tatsächlich aufgetretenen vergleichen lassen [182]. Die räumliche Auflösung des externen DEMs ist dabei nur von geringer Bedeutung, da nur beabsichtigt ist, die 4 verbliebenen Parameter des Basislinienfehlers, die beiden konstanten und die beiden linearen Anteile von E_y und E_z , zu bestimmen.

Nachdem die Terme höherer Ordnung korrigiert worden sind, lässt sich der verbliebene Basislinienfehler E_{nm}^{res} im Entfernungspixel n und Azimutpixel m als

$$E_{nm}^{res} = (E_z^0 + x_m E_z^1) \cos \theta_n \pm (E_y^0 + x_m E_y^1) \sin \theta_n \quad (4.29)$$

modellieren. E^0 und E^1 bezeichnen jeweils den konstanten und den linearen Basislinienfehler in Entfernung x_m . E_{nm}^{res} lässt sich direkt durch Subtraktion des aus dem DEM erzeugten, synthetischen Interferogramms von dem tatsächlich gemessenen Interferogramm bestimmen. Dazu müssen im gemessenen Interferogramm die bereits bestimmten Fehler höherer Ordnung korrigiert [155] und das Ergebnis nach der Differenzbildung mit $\lambda/4\pi$ skaliert werden, um Phasenwerte in Längen umzurechnen. Falls nötig, muss vor der Skalierung eine Phase-Unwrapping vorgenommen werden, was aber hier relativ unkritisch ist, da nur wenige verbleibende Interferenzringe zu erwarten sind.

Wie zuvor kann eine Bestimmung der 4 unbekannten Parameter $e_{yz}^{res} = [E_y^0, E_y^1, E_z^0, E_z^1]$ durch eine globale gewichtete kleinste Quadrate Optimierung geschehen:

$$e_{yz}^{res} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} E^{res} \quad . \quad (4.30)$$

E^{res} ist ein Vektor der Länge $N \cdot M$, gebildet von allen Pixeln des skalierten Differenzinterferogramms, wobei M die Anzahl von Pixeln in Azimut bezeichnet. \mathbf{A} ist entsprechend eine Matrix der Größe $4 \times (N \cdot M)$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \pm \sin \theta_1 & \pm x_1 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & x_1 \cos \theta_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \pm \sin \theta_N & \pm x_1 \sin \theta_N & \cos \theta_N & x_1 \cos \theta_N \\ \pm \sin \theta_1 & \pm x_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & x_2 \cos \theta_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \pm \sin \theta_N & \pm x_M \sin \theta_N & \cos \theta_N & x_M \cos \theta_N \end{bmatrix} \quad , \quad (4.31)$$

wobei \mathbf{W} eine $NM \times NM$ Diagonalmatrix analog zu Gl. 4.27 darstellt. Ganz offensichtlich stellt die enorme Größe der beteiligten Matrizen ein Problem für praktische Implementationen dar. Da das Bestimmungsproblem aber stark überbestimmt ist, ist es unproblematisch das Differenzinterferogramm stark zu unterabtasten, um den Rechenaufwand für die Bestimmung von Gl. 4.31 zu verringern. Da \mathbf{W} diagonal ist, ist es außerdem trivial, $\mathbf{A}^T \mathbf{W}$ ohne explizite Bildung von \mathbf{W} zu berechnen.

Sobald e_{yz}^{res} bekannt ist, lässt sich mit Hilfe von Gl. 4.29 eine Basislinienkorrektur oder alternativ eine Phasenkorrektur für das resultierende Interferogramm bestimmen.

4.3.3 Konvertierung von Phase zu Höhe

Sind alle Restbewegungsfehler korrigiert, so liegt im Prinzip ein Interferogramm vor, dessen Phase Rückschlüsse auf die Topographie der Szene zulässt⁴. Die genaue Bestimmung der Topographie erfordert eine Umrechnung der gemessenen Phasen in Höhenwerte. Wie in Kapitel 4.2.3 erläutert, ist im Flugzeugfall Gl. 4.7 dafür nicht ausreichend. Zusätzlich hat eine topographieabhängige Bewegungskompensation selbst einen Einfluss auf den interferometrischen Phaseneffekt.

Die topographieabhängige Bewegungskompensation korrigiert den Laufzeitunterschied zwischen der wahren und der Referenzposition unter Verwendung des auf das Höhenmodell bezogenen Einfallswinkels (vergleiche Abb. 4.8). Danach erscheinen die Aufnahmen so, als seien sie von den Re-

⁴nach Abwicklung der gemessenen Phasen in absolute Phasenwerte

ferenzpositionen aus aufgenommen worden. Dies bedeutet, dass sich die Höhen des Höhenmodells selbst tatsächlich mit der Referenzbasislinie B_{ref} skalieren:

$$\Phi_{topo} \simeq \frac{2\omega B_{ref} \cos(\theta(r) - \varepsilon_{ref})}{cr \sin(\theta(r))} h_0 \quad , \quad (4.32)$$

wobei beachtet werden muss, dass der Abstrahlwinkel θ selber von der Entfernung r abhängig ist. h_0 bezeichnet hier eine relative Höhen im verwendeten Referenzhöhenmodell im Bezug auf eine unbekannte Höhe. Um absolute Höhen zu erhalten, ist eine bekannte Referenz zur Kalibrierung der Bildgeometrie nötig. Für die Höhen des verwendeten DEMs gilt also Gl. 4.32.

Treten hingegen in der Realität Abweichungen von dem zur Bewegungskompensation verwendeten Höhenmodell auf, so skalieren diese *Unterschiede* mit der real aufgetretenen Basislinie:

$$\Phi_{topo} \simeq \frac{2\omega B_{real} \cos(\theta(r) - \varepsilon_{real})}{cr \sin(\theta(r))} \Delta h_{topo} \quad , \quad (4.33)$$

wobei $\Delta h_{topo} = h - h_0$ die Abweichung der tatsächlichen Topographie h von dem verwendeten Höhenmodell bezeichnet. Verständlich wird dieser Effekt, wenn man bedenkt, dass letztendlich die reale Basislinie für den interferometrischen Phaseneffekt verantwortlich ist, während die Bewegungskompensation versucht, eine der Referenzbasislinie und dem Höhenmodell entsprechende Phase zu generieren. Die Situation ist also fast identisch mit der in Kapitel 4.2.3 beschriebene, jedoch fungiert nun statt einer flachen Referenzebene das Höhenmodell selbst als Referenzebene.

Es sind daher mehrere Schritte nötig, um nun aus der gemessenen interferometrischen Phase topographische Höhen zu gewinnen: Zuerst wird mit Gl. 4.32 die durch das Höhenmodell zu erwartende Phase bestimmt (die sogenannte *synthetische Phase*) und von der gemessenen interferometrischen Phase subtrahiert. Es verbleibt ein Term, der gemäß Gl. 4.33 proportional zu dem Fehler des Höhenmodells ist. Durch Lösen von Gl. 4.33 erhält man also den Höhenmodellfehler, welcher eine Aktualisierung des verwendete Höhenmodells repräsentiert. Durch Addition des verwendeten Höhenmodells zu dem nun bekannten Fehler erhält man schließlich eine genaue Messung der topographischen Höhen.

4.3.4 Experimentelle Ergebnisse

Die beschriebenen Techniken wurden auf Daten zweier verschiedener Testgebiete angewandt, die beide von dem experimentellen SAR Sensor (E-SAR) des DLRs im L-Band aufgenommen wurden. Das erste Gebiet entspricht dem aus Abschnitt 4.3.1; es handelt sich um eine sehr bergige und bewaldete Gegend in den bayerischen Voralpen. Aufgrund der starken topographischen Höhenvariationen in der Szene, ist die Verwendung einer topographieadaptiven Bewegungskompensation hier unbedingt notwendig, um Phasenfehler durch die Kopplung von Topographie und Bewegungskompensation zu vermeiden. Der Zeitabstand der beiden Aufnahmen beträgt 39 Tage, was eine verhältnismäßig geringe mittlere Kohärenz von $\gamma = 0.39$ zur Folge hat.

Die Daten wurden mit einer Azimutbandbreite von 150 Hz prozessiert, was einer Auflösung von etwa 75cm und einem Antennenöffnungswinkel von etwa 10° entspricht. Zur Bestimmung von Restbewegungsfehlern, mit der in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Multisquint Prozessierung, wurden 5 sich nicht überlappende Subaperturen mit jeweils 30 Hz Bandbreite gebildet. Diese Parameter führen zu einer Vergrößerung von kohärenten Regionen um insgesamt 575 m in Azimut.

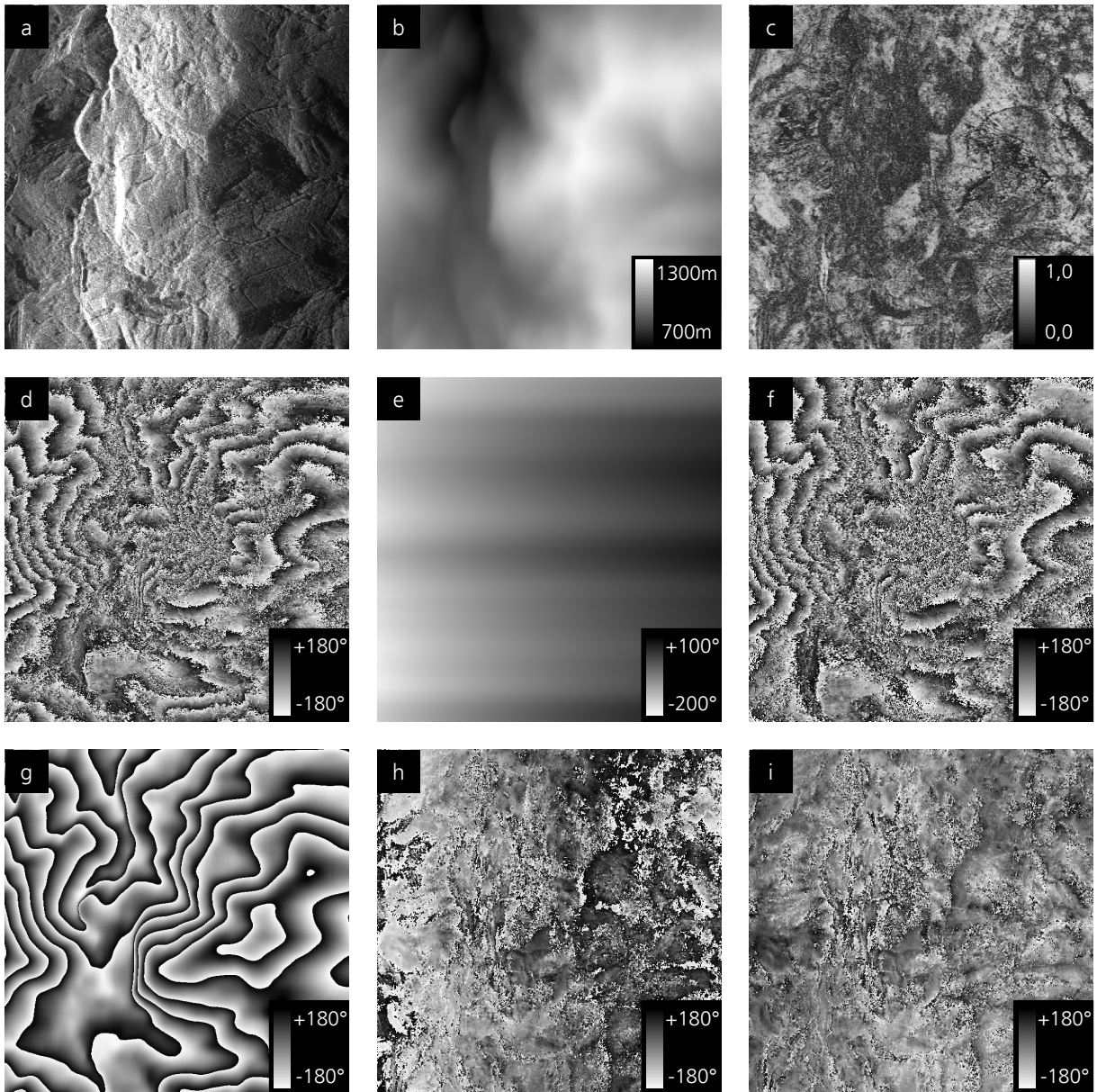


Abbildung 4.13: Ergebnisse der flugzeuggestützten SAR Interferometrie, Testgebiet: Beilngriess. a) SAR Amplitude. b) Geländetopographie, abgeleitet aus SRTM Daten. c) Interferometrische Kohärenz. d) Interferometrische Phase. e) Aus Daten geschätzter Restbewegungsfehler. f) Um Bewegungsfehler korrigierte interferometrische Phase. g) Aus dem Höhenmodell abgeleitete, zu erwartende synthetische Phase. h) Differenz aus synthetischer und interferometrischer Phase. i) Differenz nach Korrektur konstanter und linearer Terme.

Nach der Bestimmung von $\partial E / \partial x$ in LOS Richtung wurde mit Hilfe der modellbasierten Integration eine flächige Schätzung des Restbewegungsfehlers über das gesamte Bild hinweg gewonnen. Des weiteren erfolgte eine Bestimmung linearer und konstanter Restfehler, gemäß Gl. 4.30, mit Hilfe des SRTM Höhenmodells mit einer räumlichen Auflösung von 90 m. Um die Berechnungen zu beschleunigen, wurde hierbei eine Unterabtastung um den Faktor 8 vorgenommen.

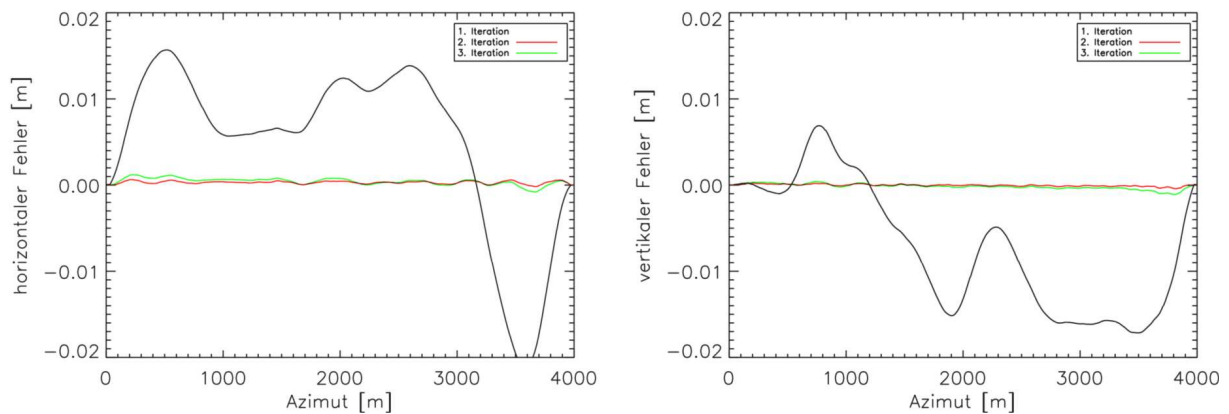


Abbildung 4.14: Ermittelte Restbewegungsfehler in horizontaler und vertikaler Richtung, bei iterativer Anwendung der Multisquint-Prozessierung (ohne konstante und lineare Komponenten).

In Abb. 4.13 sind die Ergebnisse dieser Prozessierung zusammengefasst. Die ursprüngliche interferometrische Phase, dargestellt in Abb. 4.13d, weist noch gewisse Restbewegungsfehler auf, die aber durch die starken Variationen der Topographie nicht offensichtlich sind. Nach deren Bestimmung (Abb. 4.13e) lässt sich durch Differenzbildung ein korrigiertes Interferogramm erzeugen (Abb. 4.13f), welches nur noch die topographische Information widerspiegeln sollte. Kontrollieren lässt sich dies durch Vergleich mit der aus dem Höhenmodell abgeleiteten synthetischen Phase (Abb. 4.13g). Es ergibt sich ein Differenzmuster, das noch leichte Phasentrends in Entfernung und Azimuth aufweist, die sich mit unkompensierten konstanten und linearen Basislinienfehlern erklären lassen. Werden auch diese, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, bestimmt und korrigiert, so ergibt sich die in Abb. 4.13g gezeigte Phasendifferenz, welche keine signifikanten Trends mehr aufweist, und die dem Fehler des niedrig aufgelösten SRTM Höhenmodells entspricht.

Als Kontrolle für die erzielte Genauigkeit in der Bestimmung von Restbewegungsfehlern lässt sich die in Kapitel 4.3.2 beschriebene Methode auch iterativ anwenden. Dabei wird die Slave-Aufnahme jeweils mit einer um den gemessenen Basislinienfehler korrigierten Flugbahn prozessiert. In Abb. 4.14 sind die gemessenen Basislinienfehler für die Szene aus Abb. 4.13 dargestellt. In der ersten Iteration ergibt sich ein Fehler in einer Größenordnung von 1-2 cm. Dieser geringe Basislinienfehler zeigt einerseits die an sich sehr hohe Qualität des verwendeten Navigationssystems, ist aber andererseits nicht ausreichend, um signifikante Phasenfehler in der Repeat-Pass Interferometrie zu verhindern. Weitere Iterationen führen nur noch zu sehr kleinen Restfehlern von etwa 1-2 mm, was die sehr hohe Genauigkeit der beschriebenen Methode demonstriert. Im vorliegenden Fall wird diese Genauigkeit trotz geringer Kohärenz der Szene erzielt, was einen Hinweis auf die Robustheit der Methode gegenüber Rauscheinflüssen darstellt.

Anhand eines zweiten Beispiels soll die Möglichkeit der Verbesserung von niedrig aufgelösten Höhenmodellen mit Hilfe der Methode aus Abschnitt 4.3.3 demonstriert werden. Hierzu wurden Daten des Testgebiets Oberpfaffenhofen verwendet, welches im Gegensatz zum Testgebiet Bad Feilnbach kaum topographische Variationen aufweist. Des weiteren zeigen die verwendeten Daten, aufgrund des geringen zeitlichen Abstands der Aufnahmen von nur 30 min, insgesamt eine recht hohe Kohärenz. In Abb. 4.15a ist die unkorrigierte interferometrische Phase dargestellt, welche durch Restbewegungsfehler noch deutliche Phasenundulationen entlang Azimutrichtung

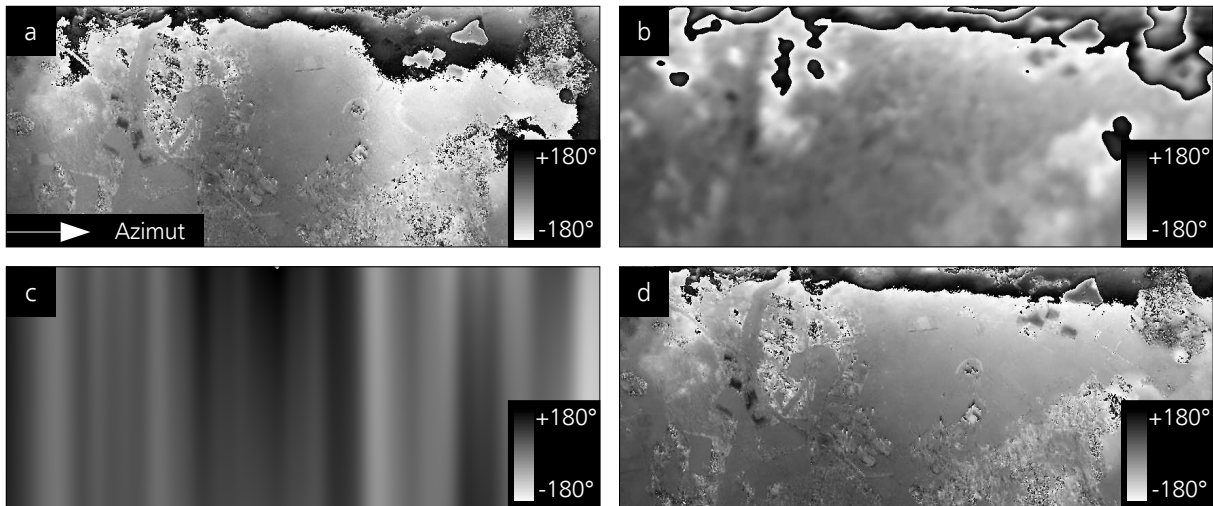


Abbildung 4.15: Korrektur von Restbewegungsfehlern. a) unkorrigiertes Interferogramm. b) synthetische Phase aus SRTM Höhenmodell (fehlerbehaftet). c) ermittelte Phasenkorrektur. d) korrigiertes Interferogramm.

aufweist. Abb. 4.15b zeigt die dazugehörige synthetische, aus einem SRTM Höhenmodell bestimmte, Phase. Deutlich zu erkennen ist die niedrige räumliche Auflösung sowie durch Fehler im Höhenmodell hervorgerufene, starke Höhenvariationen innerhalb eigentlich ebener Gebiete. Die ermittelten Restbewegungsfehler sind in Abb. 4.15c und das korrigierte Interferogramm in Abb. 4.15d dargestellt.

Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, ergibt sich durch Subtraktion der synthetischen Phase von dem korrigierten Interferogramm eine interferometrische Phase, die den Fehler des verwendeten Höhenmodells widerspiegelt. Skaliert man diese Phase mit der real aufgetretenen lokalen Basislinie, so erhält man eine direkte Korrektur für das Höhenmodell. In Abb. 4.16 wird eine solche Höhenmodellverbesserung demonstriert. Abb. 4.16a zeigt das ursprüngliche, stark fehlerbehaftete SRTM Höhenmodell, während Abb. 4.16b das durch das zusätzliche SAR Interferogramm verbesserte Höhenmodell darstellt. Die Fehler des SRTM Höhenmodells wurden gut korrigiert und wirken sich nicht mehr signifikant auf die Qualität des Ergebnisses aus. Grundsätzlich lässt sich der gesamte Ansatz iterativ anwenden, um die Qualität der Ergebnisse weiter zu steigern. Dazu müsste man eine oder mehrere weitere Prozessierungen vornehmen, wobei jeweils das verbesserte Höhenmodell (Abb. 4.16b) der vorherigen Iteration die Grundlage der Prozessierung darstellen würde.

4.4 Schlussfolgerungen

Die SAR Interferometrie stellt neben der SAR Polarimetrie die zweite wichtige Erweiterung der konventionellen SAR Abbildung dar. Bei ihr wird durch einen zweiten Überflug die Anzahl von Observablen auf 2 komplexe Werte pro Pixel erhöht, wobei der erhöhte Informationsgehalt vor allem in einer genaueren Kenntnis der Aufnahmegeometrie besteht. Durch die zweite Aufnahme wird die zylindrische Symmetrie der SAR Abbildung gebrochen, was es erlaubt, die genaue Richtung des empfangenen Echos und, zusammen mit der Laufzeit, die topographische Höhe

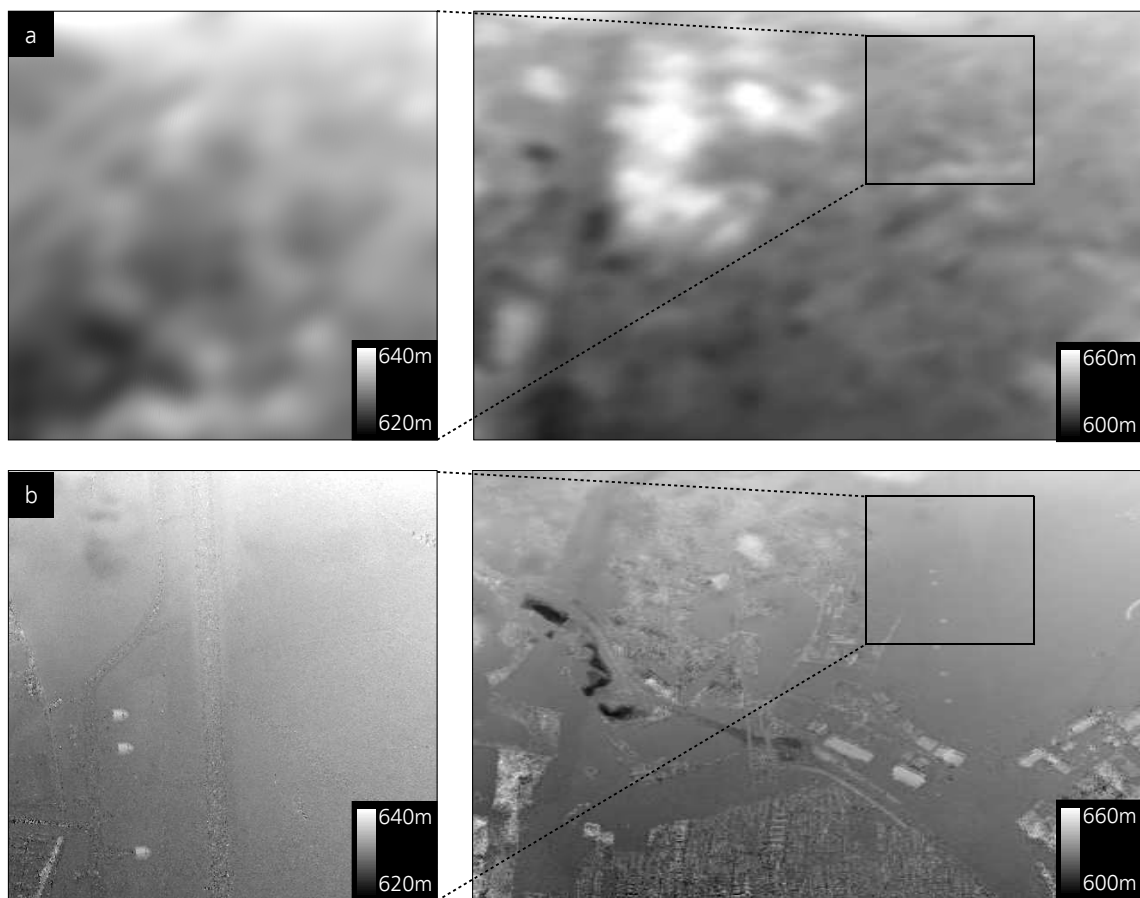


Abbildung 4.16: Aktualisierung fehlerhafter bzw. niedrigauflösender Höhenmodelle. a) Ausschnitt aus SRTM Höhenmodell mit deutlichen Höhenfehlern. b) Aktualisiertes Höhenmodell. Die glatte Topographie des Geländes wird nun deutlich erkennbar.

des streuenden Objekts zu bestimmen. Daraus ergeben sich eine Vielzahl von Anwendungen, von der Erstellung von Höhenmodellen, über die Messung von Deformationseffekten, bis hin zur Bestimmung von Vegetationshöhen. Bislang wird SAR Interferometrie hauptsächlich in Form von Repeat-Pass Interferometrie von satellitengestützten Sensoren, bzw. in Form von Single-Pass Interferometrie von flugzeuggestützten Sensoren aus betrieben.

Die wesentlich flexiblere flugzeuggestützte Repeat-Pass Interferometrie, welche eine freie Wahl der Wellenlänge sowie der Länge und Anzahl der Basislinien zulässt, stellt erheblich höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Flugnavigation und der Prozessierungskette. Insbesondere das Vorhandensein von unkorrelierten Restbewegungsfehlern und Einflüsse der Topographie auf die Bewegungskompensation stellen große Probleme dar, was bislang den operationellen Einsatz dieser Technik verhindert hat. Die wichtigsten Unterschiede zu der einfacheren satellitengestützten Repeat-Pass Interferometrie wurde in Kapitel 4.2 im Detail vorgestellt.

In Kapitel 4.3 wurden daher zwei neuartige Techniken eingeführt, welche in der Lage sind die bekannten Unzulänglichkeiten bei der flugzeuggestützten Repeat-Pass Interferometrie auszugleichen. Das erste Verfahren, beschrieben in Abschnitt 4.3.1, beschäftigt sich mit der Realisierung einer topographieadaptiven Bewegungskompensation [157][158]. Dabei wird vor der Azimut-

kompression über eine Blockprozessierungsstrategie eine Zeit-Frequenz-Zerlegung jedes der beiden SAR Aufnahmen vorgenommen. Dies erlaubt es für jede Sensorposition, die unter einem bestimmten Squintwinkel gesehene Topographie zu bestimmen und damit adaptiv den damit verbundenden Phasenfehler zu korrigieren. Das Ergebnis ist eine Aufnahme, welche sich nur minimal von einer idealen, mit einem Zeitbereichsprozessor generierten Aufnahme, unterscheidet. Des weiteren wurde in Abschnitt 4.3.2 ein Verfahren zur Detektion von kleinsten Restbewegungsfehlern aus den Daten selbst vorgestellt [171][172]. Dazu wird wiederum zuerst eine Zeit-Frequenz-Zerlegung der Daten vorgenommen, um eine präzise Koregistrierung der Bildpaare zu erzielen. Diese Koregistrierung lässt sich dann über Modellierung der Aufnahmegeometrie und ein gewichtetes kleinste Quadrate Verfahren in einen zeitabhängigen Basislinienfehler umrechnen. Mit dessen Kenntnis kann die Flugbahn der Slave-Aufnahme korrigiert, und so ein verbessertes Prozessierungsergebnis erzielt werden.

Die vorgeschlagenen Beobachtungen und Methoden sind bedeutend, da sie beide zusammen die Anwendung von flexibler flugzeuggestützter Repeat-Pass Interferometrie möglich werden lassen. Damit erweitert sich das Anwendungsspektrum von flugzeuggestützten Sensoren signifikant. Insbesondere lassen sich Befliegungen mit mehreren Basislinien, d.h. mit mehr als nur 2 Überflügen realisieren; ebenso wird die differentielle SAR Interferometrie mit flugzeuggestützten Sensoren ermöglicht [174][175][153].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Informationsgehalt des multimodalen SARs geht weit über den der normalen einkanaligen SAR Abbildung hinaus. Mit multimodalen Techniken ist es möglich „versteckte“ Eigenschaften in den Daten aufzudecken und auszunutzen und so den Beobachtungsraum der SAR Sensorik stark zu erweitern, genauere Ergebnisse zu erzielen und ganz allgemein neue Anwendungsfelder zu erschließen. Der Fokus dieser Arbeit lag vor allem auf der Entwicklung von neuartigen Techniken, die die spezifischen Besonderheiten des mehrkanaligen bzw. des in mehrere Komponenten aufgespaltenen SAR Signals ausnutzen.

In Kapitel 1 wurde eine Vielzahl möglicher mehrkanaliger Erweiterungen des konventionellen SARs im Überblick dargestellt; in dieser Arbeit kann davon selbstverständlich nur eine Unter-
menge betrachtet werden. Die behandelten Themenbereiche umfassen die eigentliche Bildgenerierung, sowie die mehrkanaligen Erweiterungen SAR Polarimetrie und SAR Interferometrie; zusätzlich wurden in allen drei Bereichen Methoden der Zeit-Frequenz Analyse und in der SAR Polarimetrie statistische Verfahren des räumlichen Kontextes eingesetzt.

Kapitel 2 behandelt die SAR Prozessierung, also die Umwandlung von Radarrohdaten in ein hochauflösendes Bildergebnis. Es wird ein neuer Prozessierungsalgorithmus entwickelt, der in der Lage ist, eine präzise entfernungsabhängige Bewegungskompensation im Rahmen der hochgenauen Wellenzahlprozessierung vorzunehmen. Mit dem vorgestellten Algorithmus ist es möglich, Daten von modernen flugzeuggestützten Sensoren mit hohen Bandbreiten und Aperturwinkeln auf effiziente Weise zu prozessieren. Die SAR Prozessierung ist für sich alleine genommen keine multimodale Technik, stellt aber die Grundlage für die Erzeugung qualitativ hochwertiger mehrkanaliger SAR Aufnahmen dar. Das vorgestellte Prozessierungskonzept erfordert des weiteren in einem Verarbeitungsschritt eine Zeit-Frequenz Analyse der Daten, um Bewegungsfehler in Abhängigkeit von Wellenlänge und Squintwinkel kompensieren zu können.

Das Thema von Kapitel 3 ist die SAR Polarimetrie. In diesem Themenkomplex wird mit Hilfe von Zeit-Frequenz Analysen Untersuchungen über anisotropes polarimetrisches Rückstreuverhalten durchgeführt. Es zeigt sich, dass dieser Effekt im allgemeinen nicht zu ignorieren ist. Zur Detektion und Korrektur von störenden Resonanzeffekten wird daher ein spezielles statistisches Verfahren vorgeschlagen. Außerdem wird in Kapitel 3 auch die unüberwachte Klassifikation von polarimetrischen SAR Daten betrachtet und ein neuer unüberwachter Klassifikationsalgorithmus entwickelt, der auf der Methode der „Expectation Maximisation“ in Kombination mit probabilistischer Klassenrelaxation basiert. Durch die Zuhilfenahme von räumlichem Kontext ist er in der Lage, auch bei ausgeprägten Speckleeffekt homogene Klassifikationsergebnisse zu erzielen.

Kapitel 4 beschäftigt sich schließlich mit der SAR Interferometrie und der differentiellen SAR Interferometrie. Zielsetzung in diesem Bereich ist vor allem die praktische Implementation von flexibler Repeat-Pass SAR Interferometrie mit flugzeuggestützten Sensoren, einer Technik, die in hoher Präzision bislang nur mit satellitengestützten Sensoren durchgeführt werden konnte. Zu diesem Zweck sind mehrere neue interferometrische Verarbeitungsalgorithmen entwickelt worden, die zum einen eine genauere Bewegungskompensation unter Berücksichtigung

der Geländetopographie ermöglichen und zum anderen eine Bestimmung von Basislinienfehlern aus dem Bildmaterial selbst erlauben. Beide Verfahren basieren wiederum auf einer Zeit-Frequenz Analyse der Daten bzw. der interferometrischen Phase. Mit den entwickelten Algorithmen wird es erstmals möglich, flugzeuggestützte Sensoren für Anwendungen im Bereich der differentiellen SAR Interferometrie einzusetzen.

Wie ersichtlich ist, ergeben sich durch die parallele Verarbeitung und Auswertung mehrerer Kanäle, Winkel und Aufnahmen, bzw. durch Berücksichtigung von statistischen Informationen oder Nachbarschaften, eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten, die weit über das hinausgehen, was mit einzelnen einkanaligen Aufnahmen möglich ist. Insbesondere in Hinblick auf die fortschreitenden Entwicklungen der Sensortechnik werden multimodale Techniken in Zukunft eine noch größere Bedeutung bekommen als es schon jetzt der Fall ist. So zeichnet sich aktuell vor allem ein deutlicher Trend hin zu höheren Auflösungen ab, gleichzeitig wird versucht, eine wiederholte Abbildung von Untersuchungsgebieten über einen längeren Zeitraum hinweg zu erreichen. Der erste Aspekt verbessert die Möglichkeiten der Zeit-Frequenz Analyse, da ein weiterer Winkel- und Wellenlängenbereich erfasst wird. Der zweite erlaubt in immer besserer Weise multitemporale Auswertungen sowie direkte Kombinationen von Multibaseline-Datensätzen vorzunehmen, so wie es beispielsweise in der SAR Tomographie und der Permanent-Scatterer Interferometrie praktiziert wird. Auch die SAR Polarimetrie scheint immer mehr zu einer Standardtechnik auch bei satellitengestützten Sensoren zu werden, da sie in vielen Fällen zu einem erheblichen Informationsgewinn gegenüber monopolaren Aufnahmen führt. Dabei dürfte sich insbesondere die Kombination von polarimetrischen Verfahren mit Multibaseline-Techniken zu einem hochinteressanten Gebiet entwickeln, das bislang nur am Rande, im Rahmen der polarimetrischen Interferometrie, genauer untersucht worden ist. In diesem Zusammenhang noch nicht erwähnt wurden multistatische Sensoren, also Systeme, bei denen Sender und Empfänger räumlich voneinander getrennt sind. In der Zukunft könnten solche Sensoren, vor allem bei einer Implementation mit mehreren simultan betriebenen Empfängern, zu einem enorm gesteigerten Informationsgewinn führen. Die Erdoberfläche könnte so zeitlich hoch aufgelöst unter vielfältigen Beobachtungsrichtungen aufgenommen werden. In Kombination mit den diversen multimodalen Ansätzen dürften sich völlig neue Möglichkeiten eröffnen.

Albert Einstein merkte einmal an *„Ich liebe es zu reisen, aber ich hasse es anzukommen“*. Im Bezug auf die multimodale SAR Fernerkundung sieht es momentan glücklicherweise so aus, als ob das Ziel noch weit entfernt ist und noch eine Menge neue Entwicklungen zu erwarten sind. Vielleicht ist gerade sogar einer der spannendsten Momente der Reise erreicht, an dem technische Entwicklungen der Sensortechnologie einhergehen mit methodologischen Entwicklungen in der Datenauswertung - in sich gegenseitig befruchtender Weise. So gesehen kann man nur neugierig und erwartungsvoll in die Zukunft blicken und sich weiterhin an der Reise erfreuen!

A Literaturverzeichnis

- [1] T. L. Ainsworth, R. W. Jansen, J. S. Lee, and R. Fiedler. Sub-aperture analysis of high-resolution polarimetric SAR data. *Proceedings of IGARSS'99, Hamburg, Germany*, 1:41–43, 1999.
- [2] E. Alivizatos, A. Potsis, A. Reigber, A. Moreira, and N. Uzunoglu. SAR processing with motion compensation using the extended wavenumber algorithm. *Proceedings of EUSAR'04, Ulm, Germany*, pages 157–160, 2004.
- [3] J. Askne, P. B. Dammert, L. M. Ulander, and G. Smith. C-band repeat-pass interferometric SAR observation of forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35:25–35, 1997.
- [4] E. P. W. Attema. The active microwave instrument on-board the ERS-1 satellite. *Proceedings of the IEEE*, 79(6):791–799, 1991.
- [5] G. H. Ball and J. David. *ISODATA, a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*. Stanford Research Institute, 1965.
- [6] J. D. Ballester-Berman, J. M. Lopez-Sanchez, and J. Fortuny-Guasch. Retrieval of biophysical parameters of agricultural crops using polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(4):683–694, 2005.
- [7] R. Bamler. A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(4):706–713, 1992.
- [8] R. Bamler and P. Hartl. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14:1–54, 1998.
- [9] M. Bara. *Airborne SAR Interferometric Techniques for Mapping Applications*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [10] J. R. Bennett, I. G. Cumming, and R. A. Deane. The digital processing of SEASAT synthetic aperture radar data. *Proceedings of the IEEE International Radar Conference*, pages 168–174, 1980.
- [11] J. C. Bezdek. *Pattern Recognition with fuzzy objective function algorithms*. Kluwer Academic Publishers, 1981.
- [12] W. M. Boerner and M. B. El-Arini. Polarisation dependence in electromagnetic inverse problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 29(2):262–271, 1981.
- [13] W. M. Boerner, H. Mott, E. Lüneburg, C. Livingstone, B. Brisco, R. J. Brown, and J. S. Paterson. Polarimetry in radar remote sensing: Basic and applied concepts. In *Manual of Remote Sensing Vol. 2*. John Wiley and Sons, 1998.

- [14] M. Borgeaud, S. V. Nghiem, R. T. Shin, and J. A. Kong. Theoretical models for polarimetric microwave remote sensing of earth terrain. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 3(1):61–81, 1989.
- [15] M. Borgeaud, R. T. Shin, and J. A. Kong. Theoretical models for polarimetric radar clutter. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1(1):73–91, 1986.
- [16] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. Pergamon Press, 1985.
- [17] R. N. Bracewell. *The Fourier transform and its applications, Third edition*. McGraw-Hill, 1999.
- [18] W. M. Brown and R. J. Fredricks. Range-doppler imaging with motion through resolution cells. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 5:98–106, 1969.
- [19] S. Buckreuss. Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system. *European Transactions on Telecommunications and Related Technologies*, 2(6):655–664, 1991.
- [20] C. Cafforio, C. Prati, and F. Rocca. Full resolution focusing of SEASAT SAR images in the frequency-wavenumber domain. *International Journal of Remote Sensing*, 12:491–510, 1991.
- [21] C. Cafforio, C. Prati, and F. Rocca. SAR data focusing using seismic migration techniques. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27(2):194–207, 1991.
- [22] R. E. Carande. Dual baseline and frequency along-track interferometry. *Proceedings of IGARSS'96, Houston, USA*, 2:1585–1588, 1992.
- [23] G. F. Carballo and P. W. Fieguth. Hierarchical network flow phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8):1695–1708, 2002.
- [24] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski. *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*. Artech House, 1996.
- [25] C.-T. Chen, K.-S. Chen, and J.-S. Lee. The use of fully polarimetric information for the fuzzy neural classification of SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9):2089–2100, 2003.
- [26] V. C. Chen and H. Ling. *Time-frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*. Artech House, 2002.
- [27] S. Cloude. The physical interpretation of eigenvalue problems in optical scattering polarimetry. *Proceedings of SPIE'97, San Diego*, 3121:88–99, 1997.
- [28] S. R. Cloude. *Polarimetry: The Characterization of Polarimetric Effects in EM Scattering*. PhD thesis, University of Birmingham, 1986.
- [29] S. R. Cloude. Uniqueness of target decomposition theorems in radar polarimetry. In *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry*, pages 267–298. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [30] S. R. Cloude, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou. Eigenvector methods for the extraction of surface parameters in polarimetric SAR. *Proceedings of CEOS'99, Toulouse, France*, 1999.

- [31] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5):1551–1565, 1998.
- [32] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEEE Radar, Sonar and Navigation*, 150(3):125–134, 2003.
- [33] S. R. Cloude and E. Pottier. Concept of polarisation entropy in optical scattering. *Optical Engineering*, 34(6):1599–1610, 1995.
- [34] S. R. Cloude and E. Pottier. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2):498–518, 1996.
- [35] S. R. Cloude and E. Pottier. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1):68–78, 1997.
- [36] C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique. *Engineering Geology*, 68(1):3–14, 2003.
- [37] E. Colin, C. Titin-Schnaider, W. Tabbara, and A. Reigber. Polarimetric interferometry and time-frequency analysis applied to a urban area at X-band. *Proceedings of IGARSS'05, Seoul, South-Korea*, 2:1077–1080, 2005.
- [38] M. Constantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3):813–821, 1998.
- [39] C. Cook and M. Bernfeld. *Radar Signals: An Introduction to Theory and Applications*. New York Academic Press, 1977.
- [40] J. C. Curlander and R. N. McDonough. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Processing*. John Wiley and Sons, 1991.
- [41] G. Davidson, K. Ouchi, G. Saito, N. Ishitsuka, N. Mohri, and S. Uratsuka. Polarimetric classification using expectation methods. *Polarimetric and Interferometric SAR Workshop, Communications Research Laboratory, Tokyo*, 2002.
- [42] K. A. C. de Macedo and R. Scheiber. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(2):172–176, 2005.
- [43] A. P. Dempster, N. M. Laird, and D. B. Rubin. Maximum-likelihood from incomplete data via the expectation maximisation algorithm. *Journal of Royal Statistical Society B*, 39, 1977.
- [44] L. J. Du and J.-S. Lee. Fuzzy classification of earth terrain covers using multi-look polarimetric SAR image data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(4):809–826, 1996.
- [45] P. Dubois-Fernandez, O. R. du Plessis, D. le Coz, J. Dupas, B. Vaizan, X. Dupuis, H. Cantalloube, C. Coulombeix, C. Titin-Schnaider, P. Dreuillet, J. M. Boutry, J. P. Canny, L. Kaisersmertz, J. Peyret, P. Martineau, M. Chanteclerc, L. Pastore, and J. P. Bruyant. The ONERA RAMSES SAR system. *Proceedings of IGARSS'02, Toronto, Canada*, 3:1723–1725, 2002.

- [46] J. H. G. Ender and A. R. Brenner. PAMIR - a wideband phased array SAR/MTI system. *IEE Radar, Sonar and Navigation*, 150(3):165–172, 2003.
- [47] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2202–2212, 2000.
- [48] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1):8–20, 2001.
- [49] A. Ferro-Famil, L. and Reigber and E. Pottier. Nonstationary natural media analysis from polarimetric SAR data using a two-dimensional time-frequency decomposition approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31(1):21–29, 2005.
- [50] L. Ferro-Famil. *Télédétection multi-fréquentielle et multi-temporelle d’environnements naturels à partir de données SAR polarimétriques*. PhD thesis, Université de Nantes, 2000.
- [51] L. Ferro-Famil, W.-M. Boerner, E. Pottier, and A. Reigber. Analysis of SAR response anisotropic behaviour using subaperture polarimetric data. *Proceedings of POLINSAR’03, Frascati, Italy*, 2003.
- [52] L. Ferro-Famil, P. Leducq, A. Reigber, and E. Pottier. Extraction of information from the time-frequency PolInSAR response of anisotropic scatterers. *Proceedings of IGARSS’05, Seoul, South-Korea*, 7:4856–4859, 2005.
- [53] L. Ferro-Famil, E. Pottier, and J.-S. Lee. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11):2332–2342, 2001.
- [54] L. Ferro-Famil, A. Reigber, and E. Pottier. Sub-aperture polarimetric SAR data analysis. *Proceedings of EUSAR’02, Köln, Germany*, pages 725–728, 2002.
- [55] L. Ferro-Famil, A. Reigber, and E. Pottier. Time-frequency analysis of natural scene anisotropic scattering behaviour from PolInSAR data. *Proceedings of EUSAR’04, Ulm, Germany*, pages 251–254, 2004.
- [56] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, and W.-M. Boerner. Scene characterization using sub-aperture polarimetric SAR data analysis. *Proceedings of IGARSS’02, Toronto, Canada*, pages 417–419, 2002.
- [57] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, and W.-M. Boerner. Analysis of anisotropic scattering behaviour using subaperture polarimetric SAR data. *Proceedings of IGARSS’03, Toulouse, France*, pages 434–436, 2003.
- [58] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, and W.-M. Boerner. Scene characterisation using subaperture polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10):2264–2276, 2003.
- [59] J. R. Fienup. Synthetic-aperture radar autofocus by maximizing sharpness. *Optics Letters*, 25(4):221–223, 2000.
- [60] L. R. Flake, S. C. Ahalt, and A. K. Krishnamurthy. Detecting anisotropic scattering with hidden Markov models. *IEE Radar, Sonar and Navigation*, 144(2):81–86, 1997.

- [61] G. Fornaro. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 35(3):997–1009, 1999.
- [62] G. Fornaro and G. Franceschetti. Image registration in interferometric SAR processing. *IEEE Radar, Sonar and Navigation*, 142(6):313–320, 1995.
- [63] G. Franceschetti, R. Lanari, and E. S. Marzouk. A new two-dimensional squint mode sar processor. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 32(2):854–863, 1996.
- [64] G. Franceschetti, A. Mazzeo, N. Mazzocca, V. Pascazio, and G. Schirinzi. An efficient SAR parallel processor. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27(2):343–353, 1991.
- [65] A. Freeman and S. L. Durden. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3):963–973, 1998.
- [66] A. Freeman, J. Villaseñor, J. D. Klein, P. Hoogeboom, and J. Groot. On the use of multi-frequency and polarimetric radar backscatter features for classification of agricultural crops. *International Journal of Remote Sensing*, 15(9):1799–1812, 1994.
- [67] J. E. Freund. *Mathematical Statistics*. Prentice Hall, 1992.
- [68] R. Furuta, M. Shimada, T. Tadono, and M. Watanabe. Interferometric capabilities of ALOS PALSAR and its utilization. *Proceedings of FRINGE'05*, 2005.
- [69] F. Gatelli, A. Monti-Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, and F. Rocca. The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4):855–865, 1994.
- [70] J. Gazdag and P. Sguazzero. Migration of seismic data. *Proceedings of the IEEE*, 72(10):1302–1315, 1984.
- [71] M. Gelautz, P. Paillou, C. W. Chen, and H. A. Zebker. Radar stereo- and interferometry-derived digital elevation models: comparison and combination using Radarsat and ERS-2 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(24):5243–5264, 2003.
- [72] D. Geudtner, P. W. Vachon, K. E. Mattar, and A. L. Gray. RADARSAT repeat-pass SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS'98, Seattle, USA*, 3:1635–1637, 1998.
- [73] R. M. Goldstein, H. Engelhardt, B. Kamb, and R. M. Frolich. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion - application to an antarctic ice stream. *Science*, 262:1525–1530, 1993.
- [74] R. M. Goldstein and H. A. Zebker. Interferometric radar measurements of ocean surface currents. *Nature*, 328:707–709, 1986.
- [75] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23:713–720, 1988.
- [76] J. Goodman. *Introduction to Fourier Optics, Third Edition*. McGraw-Hill, 2005.
- [77] N. R. Goodman. Statistical analysis based on a certain complex gaussian distribution. *Ann. Amth. Stat.*, 34:152–177, 1963.

- [78] R. Goodman, S. Tummla, and W. Carrara. Issues in ultra-wideband, widebeam SAR image formation. *Radar Conference*, pages 479–485, 1995.
- [79] L. C. Graham. Synthetic interferometric radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62:763–768, 1974.
- [80] C. D. Graves. Radar polarization power scattering matrix. *Proceedings of the IRE*, 44(5):248–252, 1956.
- [81] S. Guillaso and A. Reigber. Scatterer characterisation using polarimetric sar tomography. *Proceedings of IGARSS'05, Seoul, South-Korea*, 4:2685–2688, 2005.
- [82] J. O. Hagberg, L. M. Ulander, and J. Askne. Repeat-pass interferometry over forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2):331–340, 1995.
- [83] R. F. Hanssen. *Radar Interferometry : Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Press, 2001.
- [84] R. F. Hanssen and R. Bamler. Evaluation of interpolation kernels for sar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37:319–321, 1999.
- [85] R. Harris. Contextual classification post-processing of Landsat data using a probabilistic relaxation model. *International Journal of Remote Sensing*, 6:847–866, 1985.
- [86] H. Hellsten and L. E. Andersson. An inverse method for processing of synthetic aperture radar data. *Inverse Problems*, 3:111–124, 1987.
- [87] S. Hinz, F. Meyer, A. Laika, and R. Bamler. Spaceborne traffic monitoring with dual channel synthetic aperture radar theory and experiments. *Proceedings of CVPR'05*, 3, 2005.
- [88] R. Horn. The quadrature demodulation unit: A subsystem of the experimental SAR system E-SAR of DFVLR. *DLR Technical Report ER-TN-DFV-AM-0001*, 1986.
- [89] R. Horn. The DLR airborne SAR project E-SAR. *Proceedings of IGARSS'96, Lincoln, USA*, pages 1624–1628, 1996.
- [90] J. R. Huynen. *Phenomenological Theory of Radar Targets*. PhD thesis, Delft University of Technology, 1970.
- [91] R. C. Jones. A new calculus for the treatment of optical systems, part I-III. *Journal of the Optical Society of America*, 31:488–503, 1941.
- [92] R. L. Jordan, B. L. Huneycutt, and M. Werner. The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system. *Proceedings of the IEEE*, 79:827–838, 1991.
- [93] D. Just and R. Bamler. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. *Applied Optics*, 33(20):4361–4368, 1994.
- [94] M. Jäger, M. Neumann, S. Guillaso, and A. Reigber. The distribution of interferometric phase differentials and a self-initialising PolInSAR classifier. *Proceedings of EURAD'05, Paris, France*, 2005.

- [95] M. Jäger, M. Neumann, S. Guillaso, and A. Reigber. The distribution of interferometric phase differentials and a self-initialising PolInSAR classifier. *Proceedings of EUSAR'06, Dresden, Germany*, 2006.
- [96] M. Jäger, M. Neumann, S. Guillaso, and A. Reigber. A self-initialising PolInSAR classifier using interferometric phase differentials. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007 (submitted).
- [97] B. M. Kampes. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer, 2006.
- [98] D. Kim, W. M. Moon, D. Moller, and D. A. Imel. Measurements of ocean surface waves and currents using L- and C-band along-track interferometric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(12):2821–2832, 2003.
- [99] H. Kimura and N. Ito. ALOS/PALSAR: The Japanese second-generation spaceborne SAR and its applications. *Proceedings of SPIE*, 4152:110–119, 2000.
- [100] J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington, and W. J. Albersheim. The theory and design of chirp radars. *The Bell System Technical Journal*, 39(4), 1960.
- [101] R. Klemm. *Principles of space-time adaptive processing, 3rd edition*. Institution for Engineering and Technology, 2006.
- [102] A. B. Kostinski and W. M. Boerner. On the foundations of radar polarimetry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(12):1395–1404, 1986.
- [103] E. Krogager. A new decomposition of the radar target scattering matrix. *IEE Electronic Letters*, 26(18):1525–1526, 1990.
- [104] E. Krogager. *Aspects of Polarimetric Radar Imaging*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 1993.
- [105] R. Kwock and M. A. Fahnestock. Ice sheet motion and topography from radar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(1):189–220, 1996.
- [106] R. Lanari. A new method for the compensation of the SAR range cell migration based on the chirp Z-transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33:1296–1299, 1995.
- [107] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorqui, P. Berardino, and E. Sansosti. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7):1377–1386, 2004.
- [108] F. Leberl. Mapping of lunar surface from side-looking orbital radar imagery. *The Moon*, 15:329–342, 1976.
- [109] F. Leberl, K. E. Maurice, and J. K. Thomas. Radargrammetric analysis with Magellan data of planet Venus. *Proceedings of ISPRS'92, Albuquerque, USA*, pages 253–263, 1992.
- [110] J.-S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, L.-J. Du, D. L. Schuler, and S. R. Cloude. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex wishart classifier. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5):2249–2258, 1999.

- [111] J.-S. Lee, M. R. Grunes, and R. Kwok. Classification of multi-look polarimetric SAR imagery based on the complex wishart distribution. *International Journal of Remote Sensing*, 15(11):2299–2311, 1994.
- [112] J.-S. Lee, M. R. Grunes, E. Pottier, and L. Ferro-Famil. Unsupervised terrain classification preserving polarimetric scattering characteristics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4):722–731, 2004.
- [113] J.-S. Lee, K. W. Hoppel, S. A. Mango, and A. R. Miller. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5):1017–1028, 1994.
- [114] J. S. Lee, D. Schuler, and T. L. Ainsworth. Polarimetric sar data compensation for terrain azimuth slope variations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2153–2163, 2000.
- [115] J.-S. Lee, D.-L. Schuler, and T.-L. Ainsworth. Scattering model based speckle filtering of polarimetric SAR data. *Proceedings of EUSAR'04, Ulm, Germany*, pages 203–207, 2004.
- [116] E. N. Leith and J. Upatnieks. Range-azimuth coupling aberrations in pulse-scanned imaging systems. *Journal of the Optical Society of America*, 63:119–126, 1973.
- [117] C. Lopez-Martinez and X. Fabregas. Modeling and reduction of SAR interferometric phase noise in the wavelet domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12):2553–2566, 2002.
- [118] C. Lopez-Martinez and X. Fabregas. Polarimetric SAR speckle noise model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10):2232–2242, 2003.
- [119] J. Louet and S. Bruzzi. ENVISAT mission and system. *Proceedings of IGARSS'99, Hamburg, Germany*, 3:1680–1682, 1999.
- [120] S. N. Madsen. Motion compensation for ultra wide band SAR. *Proceedings of IGARSS'01, Sydney, Australia*, pages 1436–1438, 2001.
- [121] S. N. Madsen and J. Dall. Processing of the danish C-band SAR data. *Proceedings of IGARSS'90*, pages 2029–2032, 1990.
- [122] S. N. Madsen and H. A. Zebker. Imaging radar interferometry. In *Manual of Remote Sensing Vol. 2*. John Wiley and Sons, 1998.
- [123] D. Massonet, P. Briole, and A. Arnaud. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 375:567–570, 1993.
- [124] D. Massonet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Pelzer, K. Feigl, and T. Rabaute. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364:138–142, 1993.
- [125] P. Meisl, A. A. Thompson, and A. P. Luscombe. RADARSAT-2 mission - Overview and development status. *Proceedings of EUSAR'00, München, Germany*, pages 373–376, 2000.
- [126] F. Meyer and S. Hinz. The feasibility of traffic monitoring with TerraSAR-X - analyses and consequences. *Proceedings of IGARSS'04, Anchorage, USA*, 2:1502–1505, 2004.

- [127] A. S. Milman. SAR imaging by omega-k migration. *International Journal of Remote Sensing*, 14(10):1965–1979, 1993.
- [128] A. Monti-Guarnieri, D. Daria, C. Cafforio, P. Guccione, P. Pasquali, D. Nüesch, D. Small, E. Meier, and Y. L. Desnos. ENVISAT interferometry for mapping and monitoring: preliminary results. *Proceedings of FRINGE'03*, 2003.
- [129] A. Moreira. Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(4):714–722, 1992.
- [130] A. Moreira and Y. Huang. Airborne SAR processing of high squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5):1029–1040, 1994.
- [131] A. Moreira, G. Krieger, I. Hajnsek, D. Hounam, M. Werner, S. Riegger, and E. Settelmeyer. TanDEM-X: A TerraSAR-X add-on satellite for single-pass SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS'04, Anchorage, USA*, 2:100–1003, 2004.
- [132] A. Moreira, J. Mittermayer, and R. Scheiber. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in Stripmap and ScanSAR imaging modes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5):1123–1136, 1996.
- [133] J. R. Moreira. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4):620–626, 1990.
- [134] R. L. Morrison and D. C. Munson. An experimental study of a new entropy-based SAR autofocus technique. *Proceedings of ICIP'02, Rochester, USA*, 2:441–444, 2002.
- [135] H. Mott. *Antennas for Radar and Communications: A Polarimetric Approach*. John Wiley and Sons, 1992.
- [136] R. J. Muirhead. *Aspects of Multivariate Statistical Theory*. John Wiley and Sons, 1982.
- [137] T. J. Nohara, P. Weber, A. Premji, and C. Livingstone. SAR-GMTI processing with Canada's Radarsat 2 satellite. *Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium*, pages 379–384, 2000.
- [138] R. V. Ostrovityanov and F. A. Basalov. *Statistical Theory of Extended Radar Targets*. Artech House, 1985.
- [139] K. Ouchi, G. Davidson, G. Saito, N. Ishitsuka, N. Mohri, and S. Uratsuka. Automatic rice-crop mapping using maximum likelihood sar segmentation and gaussian expectation maximisation. *Proceedings of IGARSS'02, Toronto, Canada*, 1:475–477, 2002.
- [140] M. Paganini, F. Palazzo, O. Arino, P. Manunta, A. Ferretti, E. Gontier, S. Wunderle, P. Pasquali, T. Strozzi, J. Zilger, and C. van Westen. SLAM, the development of an EO service to support the legal obligations of Swiss and Italian geological risk services in landslide risk forecasting and prevention. *Proceedings of IGARSS'03, Toulouse, France*, 4:2422–2424, 2003.
- [141] R. M. Page. *The Origin of Radar*. Anchor Books, 1962.

- [142] K. P. Papathanassiou. *Polarimetric SAR Interferometry*. PhD thesis, Technische Universität Graz, 1999.
- [143] K. P. Papathanassiou and S. R. Cloude. Single-baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11):2352–2361, 2001.
- [144] A. Papoulis. *Signal Analysis*. McGraw-Hill, 1977.
- [145] W. Pauli. Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons. *Zeitschrift für Physik A*, 43:601–625, 1927.
- [146] F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti. *Introduction to Optics, Second Edition*. Prentice-Hall, 1992.
- [147] A. Potsis, A. Reigber, E. Alivizatos, A. Moreira, and N. Uzunoglu. Comparison of chirp scaling and wavenumber domain algorithms for airborne low-frequency SAR data processing. *Proceedings of SPIE'02, Crete, Greece*, 2002.
- [148] A. Potsis, A. Reigber, J. Mittermayer, A. Moreira, and N. Uzunoglou. Improving the focusing properties of SAR processors for wide-band and wide-beam low frequency imaging. *Proceedings of IGARSS'01, Sydney, Australia*, 7:3047–3049, 2001.
- [149] A. Potsis, A. Reigber, J. Mittermayer, A. Moreira, and N. Uzunoglou. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide-beam SAR data processing. *IEE Electronic Letters*, 37(23):1405–1407, 2001.
- [150] A. Potsis, A. Reigber, A. Moreira, L. Ferro-Famil, and N. Uzunoglou. Comparison of chirp scaling and wavenumber domain processing algorithms for airborne low frequency SAR data processing. *Proceedings of EUSAR'02, Köln, Germany*, pages 69–72, 2002.
- [151] C. Prati, F. Rocca, A. Monti-Guarnieri, and E. Damonti. Seismic migration for sar focusing: Interferometrical applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4):627–640, 1990.
- [152] P. Prats, K. A. Macedo, A. Reigber, R. Scheiber, and J. Mallorqui. Comparison of topography and aperture dependent motion compensation algorithms for airborne SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007 (in print).
- [153] P. Prats, A. Reigber, P. Blanco, J. J. Mallorqui, and A. Moreira. Advanced differential SAR interferometric techniques applied to airborne data. *Proceedings of EUSAR'06, Dresden, Germany*, 2006.
- [154] P. Prats, A. Reigber, and J. J. Mallorqui. Discussion on the detection and correction of residual motion errors in airborne SAR interferometry. *Proceedings of EUSAR'04, Ulm, Germany*, pages 321–324, 2004.
- [155] P. Prats, A. Reigber, and J. J. Mallorqui. Interpolation-Free Coregistration and Phase-Correction of Airborne SAR Interferograms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(3):188–191, 2004.
- [156] P. Prats, A. Reigber, and J. J. Mallorqui. Retrieval of high-quality interferometric SAR products with airborne repeat-pass systems. *Proceedings of IGARSS'05, Seoul, South-Korea*, 7:4582–4585, 2005.

- [157] P. Prats, A. Reigber, and J. J. Mallorqui. Topography accomodation during motion compensation in interferometric repeat-pass SAR images. *Proceedings of IGARSS'05, Seoul, South-Korea*, 1:328–331, 2005.
- [158] P. Prats, A. Reigber, and J. J. Mallorqui. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass SAR systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(2):206–210, 2005.
- [159] P. Prats, A. Reigber, J. J. Mallorqui, and A. Broquetas. Efficient detection and correction of residual motion errors in airborne SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS'04, Anchorage, USA*, 2:992–995, 2004.
- [160] M. Pritt. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(3):728–738, 1996.
- [161] R. K. Raney, A. P. Luscombe, E. Langham, and S. Ahmed. Radarsat. *Proceedings of the IEEE*, 79:839–849, 1991.
- [162] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. Cumming, and F. Wong. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4):786–799, 1994.
- [163] A. Reigber. Correction of residual motion errors in airborne SAR interferometry. *IEE Electronic Letters*, 37(17):1083–1084, 2001.
- [164] A. Reigber, E. Alivizatos, A. Potsis, and A. Moreira. Extended wavenumber domain SAR focusing with integrated motion compensation. *IEE Radar, Sonar and Navigation*, 153(3):301–310, 2006.
- [165] A. Reigber and L. Ferro-Famil. Interference suppression in synthesized SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(1):45–49, 2005.
- [166] A. Reigber, M. Jäger, M. Neumann, and L. Ferro-Famil. Polarimetric fuzzy k-means classification with neighbourhood support. *Proceedings of POLINSAR'07, Frascati, Italy*, 2007.
- [167] A. Reigber, M. Jäger, M. Neumann, and L. Ferro-Famil. Classifying polarimetric SAR data by combining expectation methods with spatial context. *International Journal of Remote Sensing*, 2007 (submitted).
- [168] A. Reigber and A. Moreira. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2142–2152, 2000.
- [169] A. Reigber and K. P. Papathanassiou. Correction of residual motion errors in airborne repeat-pass SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS'01, Sydney, Australia*, 7:3077–3079, 2001.
- [170] A. Reigber, A. Potsis, E. Alivizatos, N. Uzunoglu, and A. Moreira. Wavenumber domain SARfocusing with integrated motion compensation. *Proceedings of IGARSS'03, Toulouse, France*, pages 1465–1467, 2003.

- [171] A. Reigber, P. Prats, and J. J. Mallorqui. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS'05, Seoul, South-Korea*, 7:4799–4802, 2005.
- [172] A. Reigber, P. Prats, and J. J. Mallorqui. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1):145–149, 2006.
- [173] A. Reigber, P. Prats, R. Scheiber, and J. J. Mallorqui. Options for high-precision motion compensation for airborne differential SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS'03, Toulouse, France*, 7:4356–4358, 2003.
- [174] A. Reigber and R. Scheiber. Differential SAR interferometry using an airborne platform. *Proceedings of EUSAR'02, Köln, Germany*, pages 373–376, 2002.
- [175] A. Reigber and R. Scheiber. Airborne differential SAR interferometry: First results at L-band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6):1516–1520, 2003.
- [176] J. A. Richards and X. Jia. *Remote Sensing Digital Image Analysis, 4th edition*. Springer, 2005.
- [177] F. Rocca, C. Prati, and A. Monti-Guarnieri. New algorithms for processing of SAR data. *ESA Contract Report, ESRIN Contract No. 7998/88/F/FL(SC)*, 1989.
- [178] E. Rodriguez and J. M. Martin. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proceedings F*, 139(2), 1992.
- [179] R. Romeiser, H. Breit, M. Eineder, H. Runge, P. Flament, K. De Jong, and J. Vogelzang. On the suitability of TerraSAR-X split antenna mode for current measurements by along-track interferometry. *Proceedings of IGARSS'03, Toulouse, France*, 2:1320–1322, 2003.
- [180] P. Runkle, L. H. Nguyen, J. H. McClellan, and L. Carin. Multi-aspect target detection for SAR imagery using hidden Markov models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1):46–55, 2001.
- [181] M. Sack, I. G. Cumming, and M. R. Ito. Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to synthetic aperture radar processing. *Proceedings of the IEEE*, 132:45–57, 1985.
- [182] R. Scheiber. A three-step phase correction approach for airborne repeat-pass interferometric sar data. *Proceedings of IGARSS'03, Toulouse, France*, pages 1190–1192, 2003.
- [183] R. Scheiber and A. Moreira. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2179–2191, 2000.
- [184] D. C. Schleher. *MTI radar*. Artech House, 1978.
- [185] R. Z. Schneider, K. P. Papathanassiou, I. Hajnsek, and A. Moreira. Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4):971–984, 2006.
- [186] T. L. Schuler, D. L. Ainsworth, J. S. Lee, and D. De Grandi. Topographic mapping using polarimetric SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 35(5):1266–1277, 1998.

- [187] A. Sen and M. Srivastava. *Regression Analysis: Theory, Methods, and Applications*. Springer, 1990.
- [188] G. Sinclair. The transmission and reception of elliptically polarized waves. *Proceedings of the IRE*, 38(2):148–151, 1950.
- [189] A. Sommerfeld. *Mathematische Theorie der Beugung*. Habilitation, Universität Göttingen, 1895.
- [190] M. Soumekh. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing*. Wiley-Interscience, 1999.
- [191] J.-C. Souyris, C. Henry, and F. Adragna. On the use of complex SAR image spectral analysis for target detection: assessment of polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(12):2725–2734, 2003.
- [192] O. Stebler, E. Meier, and D. Nüesch. Multi-baseline polarimetric SAR interferometry - first experimental spaceborne and airborne results. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56:149–166, 2002.
- [193] D. R. Stevens, I. G. Cumming, and A. L. Gray. Options for airborne interferometric SAR motion compensation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2):409–420, 1995.
- [194] R. Stolt. Migration by fourier transform techniques. *Geophysics*, 43:49–76, 1978.
- [195] T. Strozzi, U. Wegmüller, C. L. Werner, A. Wiesmann, and V. Spreckels. JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7):1702–1708, 2003.
- [196] E. C. Titchmarsh. *Introduction to the Theory of Fourier Integrals*. Oxford University Press, 1948.
- [197] R. Touzi and A. Lopes. Statistics of the Stokes parameters and of the complex coherence parameters in one-look and multilook speckle fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2):519–531, 1996.
- [198] F. E. Townsend. The enhancement of computer classifications by logical smoothing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52:213–221, 1986.
- [199] R. N. Treuhaft, S. N. Madsen, M. Moghaddam, and J. J. van Zyl. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric data. *Radio Science*, 31:1449–1495, 1996.
- [200] R. N. Treuhaft and P. R. Siqueira. The vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Science*, 35(1):141–177, 2000.
- [201] P. Tsakalides and C. L. Nikias. High-resolution autofocus techniques for SAR imaging based on fractional lower-order statistics. *IEEE Radar, Sonar and Navigation*, 148(5):267–276, 2001.
- [202] Y. C. Tzeng and K. S. Chen. A fuzzy neural network to SAR image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36:301–307, 1998.
- [203] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung. *Microwave Remote Sensing, Vol. 1 & 2*. Addison-Wesley, 1981.

- [204] L. M. H. Ulander, H. Hellsten, and G. Stenstrom. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 39(3):760–776, 2003.
- [205] A. Ulbricht. *Flugzeuggetragene Repeat-Pass-Interferometrie mit dem E-SAR*. PhD thesis, Ludwig-Maximilian Universität München, 2000.
- [206] H. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*. Dover Press, 1985.
- [207] J. van Zyl, R. Carande, Y. Lou, T. Miller, and K. Wheeler. The NASA/JPL three-frequency polarimetric AIRSAR system. *Proceedings of IGARSS'96, Houston, USA*, pages 649–651, 1992.
- [208] J. J. van Zyl. Unsupervised classification of scattering mechanisms using radar polarimetry data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27:36–45, 1989.
- [209] J. J. van Zyl and C. F. Burnette. Bayesian classification of polarimetric SAR images using adaptive a-priori probabilities. *International Journal of Remote Sensing*, 13:835–840, 1993.
- [210] G. Vasile, E. Trouvé, J.-S. Lee, and V. Buzuloiu. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6):1609–1621, 2006.
- [211] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz. Phase gradient autofocus: A robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 30(3):827–835, 1994.
- [212] P. W. Webley, R. M. Bingley, A. H. Dodson, G. Wadge, S. J. Waugh, and I. N. James. Atmospheric water vapor correction to InSAR surface motion measurement on mountains: Results from a dense GPS network on Mount Etna. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(4):363–370, 2002.
- [213] M. Werner. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) - Mission Overview. *Proceedings of EUSAR'00, München, Germany*, pages 209–212, 2000.
- [214] R. Werninghaus, W. Balzer, S. Buckreuss, J. Mittermayer, and P. Mühlbauer. The TerraSAR-X mission. *Proceedings of EUSAR'04, Ulm, Germany*, pages 49–52, 2004.
- [215] C. Wiley. Pulsed Doppler radar method and means, 1954. US Patent No. 3.196.436.
- [216] C. Wu. A digital fast correlation approach to produce SEASAT SAR imagery. *Proceedings of the IEEE International Radar Conference*, pages 153–160, 1980.
- [217] M. Wulder and S. Franklin. *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies*. Kluwer Academic Press, 2003.
- [218] H. A. Yueh, R. T. Shin, and J. A. Kong. Scattering from randomly perturbed periodic and quasiperiodic surfaces. *Progress in Electromagnetic Research*, 1:297–358, 1988.
- [219] L. A. Zadeh. *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. Academic Press New York, 1975.

- [220] H. A. Zebker and R. M. Goldstein. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91:4993–4999, 1986.
- [221] H. A. Zebker, P. A. Rosen, M. Goldstein, A. K. Gabriel, and C. L. Werner. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 99:19617–19634, 1994.
- [222] H. A. Zebker, J. J. van Zyl, S. L. Durden, and L. Norikane. Calibrated imaging radar polarimetry: Techniques, examples and applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29:942–961, 1991.
- [223] H. A. Zebker and J. Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echos. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5):950–959, 1992.
- [224] S. H. Zisk. A new, earth-based radar technique for the measurement of lunar topography. *Earth, Moon, and Planets*, 4(3):296–306, 1974.

B Liste der Symbole und Abkürzungen

Verwendete Abkürzungen:

ATI	Along-Track Interferometrie
APS	Atmospheric phase screen
CS	Chirp Scaling
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ECS	Extended Chirp Scaling
E-SAR	Experimentales SAR (des DLRs)
FFT	Fast Fourier Transformation
InSAR	Interferometrisches SAR
ISLR	Integriertes Nebenkeulenverhältnis Integrated sidelobe ratio
LOS	Blickrichtung (engl. <i>Line of sight</i>)
MoCo	Bewegungskompensation (engl. <i>Motion compensation</i>)
MTI	Bewegtzielerkennung (engl. <i>Moving Target Identification</i>)
PolSAR	Polarimetrisches SAR
PolInSAR	Polarimetrisches interferometrisches SAR
PRF	Pulswiederholfrequenz
PSLR	Peak sidelobe ratio
RADAR	Radio detection and ranging
RCM	Zielentfernungsänderung (engl. <i>Range cell migration</i>)
SAR	Radar mit synthetischer Apertur
SFFT	Short time fast FOURIER transformation
SLAR	Side-looking airborne radar
SLC	Single-look complex
STAP	Space-time adaptive processing
TomoSAR	Tomographisches SAR
VHF	Very high frequency

Verwendete Symbole:

A, A_k, A_i	Amplitude
A_p	polarimetrische Anisotropie
\mathbf{A}	Matrix der lokalen Einfallswinkel
\tilde{A}	gefilterte Amplitude
B, B_{\perp}	Basislinie, effektive Basislinie
B_{ref}	Basislinie zwischen Referenztracks
B_{real}	Basislinie zwischen realen Tracks
c	Lichtgeschwindigkeit

c_β	Schwellwert
\mathbf{C}	polarimetrische Kovarianzmatrix
$C_i(\dots)$	Phasenfehler der Bewegungskompensation i -ter Ordnung
D	Amplitude der periodischen Komponente einer Oberfläche
d	Versteckte Variable der Klassenzugehörigkeit
\vec{e}_i	Eigenvektoren
\vec{E}_{tot}	totale elektrische Feldstärke
$E_{h,v}$	horizontale / vertikale elektrische Feldstärke
$E^{t,r}$	gesendete / empfangene elektrische Feldstärke
E, E_n	Basislinienfehler in LOS Richtung
E^{res}	konstante und lineare Komponenten des Basislinienfehlers
E_y, E_z	Basislinienfehler in horizontaler / vertikaler Richtung
E_y^0, E_z^0	konstanter Basislinienfehler in horizontaler / vertikaler Richtung
E_y^1, E_z^1	linearer Basislinienfehler in horizontaler / vertikaler Richtung
e_{yz}	Vektor des horizontalen / vertikalen Basislinienfehlers
e_{yz}^{res}	Vektor des hor./vert. Basislinienfehlers, konstante und lineare Komponente
h	Iterationsschritt
G	Anzahl Klassen
\vec{h}	horizontaler Einheitvektor
$h_{ref}(\dots)$	Referenzfunktion
h	topographische Höhe
h_0	Referenzhöhe
H_p	polarimetrische Entropie
$\mathcal{G}_i(\dots)$	Verschiebungsoperator in Azimuth
$\tilde{H}_{ref}(\dots)$	FOURIER-Transformierte von $h_{ref}(\dots)$
\vec{J}	JONES-Vektor
k	Iterationsschritt
K	Anzahl Subaperuren
\vec{k}_3	polarimetrischer Streuvektor
\vec{k}_{3L}	lexikographischer Streuvektor
\vec{k}_{3P}	PAULI-Streuvektor
k_r	Wellenzahl in Entfernungsrichtung
k'_r	verschobene Wellenzahl in Entfernungsrichtung
k'_{rj}	verschobene Entfernungswellenzahl, gehörig zu Blockelement j
$k_{x,y}$	Wellenzahl in Azimut / senkrecht dazu
k_{xi}	Wellenzahl in Azimut, gehörig zu Blockelement i
L	reale Antennenapertur
L_{sa}	synthetische Antennenapertur
L_{sub}	synthetische Antennensubapertur
\mathcal{L}	Likelihood-Funktion
n, n_t, n_i, n_γ	Anzahl Looks
N	Anzahl Pixel in Entfernung
m	Ordnung der Resonanz
M	Anzahl Pixel in Azimut
P	Wellenlänge der periodischen Komponente einer Oberfläche
P_i	normierte Eigenwerte
P_{fa}	Fehlalarmrate

$P(t)$	Pulseinhüllende in Entfernung
$p(\dots)$	Verbundwahrscheinlichkeit der polarimetrischen Klassenzugehörigkeit
$p_q(\dots)$	Kombinierte Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit
p_{ij}	a-posteriori Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit
$q(\dots)$	Verbundwahrscheinlichkeit der Nachbarschaftsklassenzugehörigkeit
r, r_n, r_m, r_0	Koordinaten in Entfernungsrichtung
r_c	Entfernungskoordinaten der Blockmitte
r_{mc}	alle für den jeweiligen Datenblock erfolgte Bewegungskorrekturen
$r_{real, k_{xi}}$	Entfernung unter Berücksichtigung des Höhenmodells und des Squintwinkels
$\text{rect}(\dots)$	Rechteckfunktion
s_i^j	i -te Subapertur von Aufnahme j
$s_r^n(\dots)$	Totales Empfangsecho eines Streuers
$s_r^{tot}(\dots)$	Totales Empfangsecho aller Streuer (Rohdaten)
$\tilde{s}_r^{tot}(\dots)$	FOURIER-Transformierte von $s_r^{tot}(\dots)$
$s_t(\dots)$	Gesendeter Radarpuls
$\text{sinc}(\dots)$	Kardinalsinus
S	polarimetrische Streumatrix
\tilde{S}	gefilterte Streumatrix
S_{ij}	Streumatrixelement in Polarisation i, j
t	Zeit
t_{az}	Zeit in Azimut
T	polarimetrische Kohärenzmatrix
\tilde{T}	gefilterte Kohärenzmatrix
\vec{v}	vertikaler Einheitvektor
v, v_0	Vorwärtsgeschwindigkeit des Sensors
$v(\dots)$	Prozessiertes Bildergebnis
$v_{real}(\dots)$	Bildergebnis inkl. Phasenfehler
$\tilde{V}(\dots)$	FOURIER-Transformierte von $v(\dots)$
\vec{w}	polarimetrischer Streumechanismus
W	Signalbandbreite in Entfernung
$W_{Doppler}$	Signalbandbreite in Azimut
W	Gewichtungsmatrix
x, x_n, x_0	Koordinaten in Azimutrichtung
x_c	Azimutkoordinaten der Blockmitte
\bar{x}	Azimutkoordinate mit stationärer Phase
z	Höhe
α_p	polarimetrischer α -Winkel
α_{ra}	Abstrahlwinkel einer realen Apertur
α_{ra}	Abstrahlwinkel einer realen Apertur
α_{sa}	Abstrahlwinkel einer synthetischen Apertur
β	Squintwinkel
β_i	mittlerer Squintwinkel der i -ten Subapertur
β_{ij}	Squintwinkel, gehörig zu Blockelement i, j
β_p	polarimetrischer β -Winkel
χ	polarimetrische Elliptizität
δ_{sr}	Auflösung in Schrägsicht
δ_{az}	Auflösung in Azimut

$\delta(\dots)$	DIRAC'sche Deltafunktion
$\Delta f, \Delta f_{sub}$	Spektrale Separation von Supaperturen
Δh	Abweichung der Topographie von Referenzhöhe
Δh_{topo}	Höhenmodellfehler
Δk_r	Wellenzahlverschiebung in Entfernungsrichtung
$\Delta r(\dots), \Delta r_{corr}$	Verschiebung / Misregistrierung in Entfernung
Δr_{res}	Restbewegungsfehler in LOS Richtung
$\Delta x(\dots)$	Verschiebung / Misregistrierung in Azimut
$\Delta t, \Delta t_n$	Signallaufzeit
Δy	Ablagen (Bewegungsfehler) in horizontaler Richtung
Δz	Ablagen (Bewegungsfehler) in vertikaler Richtung
$\Delta \Phi_{res}$	Phasenfehler durch Restbewegungsfehler
$\Gamma_{inc}(\dots)$	unvollständige Gammafunktion
ε	Steigungswinkel der Basislinie
ε_{ref}	Steigungswinkel der Basislinie zwischen den Referenztracks
ε_{real}	Steigungswinkel der Basislinie zwischen den realen Tracks
$\varepsilon(x, r)$	Phasenfehler in der Azimutkompression
γ, γ_i	interferometrische Kohärenz
λ_i	Eigenwerte
λ	Wellenlänge
Λ	Maximum-Likelihood Verhältnis
μ	polarimetrische Streuamplitude
ω, ω_0	Kreisfrequenz, mittlere Kreisfrequenz
ω_i	i -th Klasse einer Klassifikation
Ω	gefiltertes Maximum-Likelihood Verhältnis
ϕ_0, ϕ_i, ϕ_k	Phasenlage
Φ	interferometrische Phase
Φ_{topo}	topographische interferometrische Phase
$\Phi(\dots)$	Phasenhistorie in Azimut
φ	Winkel zwischen LOS und periodischer Oberflächenstruktur
ψ	polarimetrische Orientierung
$\psi_{tot}(\dots)$	Gesamtes gemessenes Wellenfeld
$\tilde{\Psi}_{tot}(\dots)$	FOURIER-Transformierte von $\psi_{tot}(\dots)$
ρ	Reflektivität eines Einzelstreuers
$\varrho(\dots)$	Gesamtreflektivität eines Pixels
σ, σ_i	Standardabweichung der interferometrischen Phase
Σ_i	Mittlere Kohärenzmatrix einer Klasse
τ	Pulsdauer
θ, θ_n	lokaler Einfallswinkel
$\vec{\Upsilon}_{\mathbf{L}}$	lexikographische Basis
$\vec{\Upsilon}_{\mathbf{P}}$	PAULI-Basis
ξ	Laufvariable
$\Xi(x, y)$	Störungsterm einer rauen Oberfläche
\odot_x	Korrelation in x -Richtung
$ \cdot $	Determinantenbildung
\dagger	adjungiert

C Abbildungsverzeichnis

2.1	Links: SLAR/SAR Abbildungsgeometrie im <i>Strip-map</i> Modus. Rechts: Geometrische Darstellung der maximal möglichen Länge der synthetischen Apertur L_{sa}	14
2.2	Links: Realteil von simulierten komplexen Rohdaten zweier punktförmiger Ziele an unterschiedlichen Azimut- und Entfernungspositionen. Rechts: Prozessiertes Bildergebnis nach RCM Korrektur und Azimutfokussierung.	18
2.3	Multilook-Prozessierung / Bildung von Subaperturen. Links: Aufteilung der gesamten synthetischen Aperture in mehrere Subaperturen. Rechts: Darstellung der DOPPLER-Bandbreiten der Subaperturen im Frequenzraum.	22
2.4	Multilook-Prozessierung / Bildung von Subaperturen. Oben: SLC Amplitude mit maximaler Auflösung, sowie Multilook Amplitude mit 9 Looks. Auflösung und Speckle Rauschen sind reduziert. Unten: 4 Subaperturaufnahmen mit verschiedenen Squintwinkeln. Je nach relativer Orientierung der Szene zum Sensor zeigen sich leichte Variationen in der Rückstreuung.	23
2.5	Links: Azimutabhängigkeit der Größe der Bewegungskompensation durch die Sensorbewegung. Rechts: Entfernungsabhängigkeit der Bewegungskompensation durch Änderung des Blickwinkels.	24
2.6	Datenaufzeichnung. Links: Realer Prozess über Senden und Empfangen von Pulsen. Rechts: „radiating reflector“-Prozess über simultanes Aussenden eines Wellenfeldes durch die Streuer	28
2.7	„STOLT-mapping“. Links: Spektral Darstellung der aufgezeichneten Rohdaten. Rechts: In den (k_r, k_x) -Bereich transformiertes Spektrum; das „STOLT-mapping“ interpoliert Datenwerte für Linien mit konstantem k_r , d.h. es führt eine Projektion von polaren auf kartesische Koordinaten im (k_r, k_x) -Bereich durch.	30
2.8	Modifiziertes „STOLT-mapping“. Links: Spektraldarstellung der aufgezeichneten Rohdaten. Rechts: Spektrum nach Transformation in den (k'_r, k_x) -Bereich, mit Kompensation für ω_0	32
2.9	a) In den Rohdaten haben die Impulsantworten aller Wellenlängen die gleiche Länge, aber verschiedene Chirpraten. b) Nach dem modifizierten „STOLT-mapping“ sind die Chirpraten identisch, aber nicht die Ausdehnungen in Azimut. c) Wie a), aber mit Bewegungsfehlern. Ein Bewegungsfehler erscheint in allen Wellenlängen an der selben Position in Azimut. d) Nach dem modifizierten „STOLT-mapping“ variieren die Orte des Bewegungsfehlers mit der Wellenlänge. .	36
2.10	Blockdiagramm des kompletten erweiterten Wellenzahlprozessors. Links: Schematische Repräsentation von drei Punktzielen an verschiedenen Zeitpunkten der Prozessierung (Entfernung horizontal, Azimut vertikal)	37
2.11	Bei gleichem Bewegungsfehler erfordert Ziel A unter Squintwinkel Null eine andere Bewegungskorrektur Δr als das mit Squintwinkel β erfasste Ziel B, welches (gleichzeitig) um $\Delta r_\beta = \Delta r \cos \beta$ korrigiert werden muss.	39
2.12	Vertikale Bewegungsfehler des simulierten VHF-Szenarios	40

2.13	VHF Szenario. Links: Ideale 2D Impulsantwort, erzielt aus Daten ohne Bewegungsfehlern mit Hilfe eines konventionellen Wellenzahlprozessors. Rechts: 2D Impulsantwort, erzielt aus Daten mit Bewegungsfehlern mit Hilfe des erweiterten Wellenzahlprozessors.	42
2.14	VHF Simulation. Gepunktete Linie: Impulsantwort in Azimut von Rohdaten mit Bewegungsfehlern nach Prozessierung mit einem konventionellen Wellenzahlprozessors mit Bewegungskompensation 1. Ordnung. Durchgezogene Linie: Gleiche Daten prozessiert mit dem erweiterten Wellenzahlprozessor mit voller 3-stufiger Bewegungskompensation.	42
2.15	X-Band Simulation. Gepunktete Linie: Impulsantwort in Azimut von Rohdaten mit Bewegungsfehlern nach Prozessierung mit einem konventionellen Wellenzahlprozessors mit Bewegungskompensation 1. Ordnung. Durchgezogene Linie: Gleiche Daten prozessiert mit dem erweiterten Wellenzahlprozessor mit voller 3-stufiger Bewegungskompensation.	43
2.16	Reale L-Band Daten des E-SAR Sensors, prozessiert mit dem erweitertem Wellenzahlprozessor. a) Bildamplitude, ohne Verwendung spektraler Gewichtungen. b) Vergrößerung eines Bereichs, der hauptsächlich große industrielle Strukturen zeigt (Flugzeughangars) c) Interferometrische Phase (schwarz= $-\pi$, weiß= $+\pi$). d) Interferometrische Kohärenz (schwarz=0.0, weiß=1.0).	44
3.1	Oben links: Lineare Polarisierung (Bedingung: $\chi = 0^\circ$), ψ legt die Polarisationsrichtung fest. Oben Mitte: Zirkulare Polarisierung (Bedingung: $\chi = 45^\circ$), ψ ist ohne Bedeutung. Oben rechts: Elliptische Polarisierung, χ beschreibt die Elliptizität, ψ die Orientierung der Ellipse. Unten: Beispiele für χ und ψ	48
3.2	Links: Einkanalige SAR Aufnahme (HH Kanal) des Testgebiets Alling / Oberbayern. Rechts: Polarimetrisches Farbkomposit in der PAULI-Basis (rot: HH+VV, grün: HH-VV, blau: $2*HV$)	50
3.3	Links: Farbkomposit der Eigenwerte der Szene aus Abb. 3.2, rot = λ_1 , grün = λ_2 , blau = λ_3 . Mitte: Polarimetrische Streuentropie H_p der Szene. Rechts: Darstellung des α_p -Winkels der Szene	53
3.4	Merkmalsraum von Entropie und $\bar{\alpha}_p$ mit Schwellwertunterteilung in 9 Klassen. Die Kurve grenzt den mathematisch möglichen Wertebereich ab. Die Klasse Z_3 kann nicht eingenommen werden.	54
3.5	a) Unüberwachte Klassifikation in 8 Klassen durch Schwellwerteinteilung des Entropie-Alpha Raums. b) Unüberwachte Klassifikation in 16 Klassen durch Schwellwerteinteilung des Entropie-Alpha-Anisotropie Raums. Klasse Z_3 und Z_{12} können nicht auftreten.	55
3.6	Unüberwachte WISHART-Klassifikation. a) Initialisierung in 8 Klassen durch unüberwachte H_p - $\bar{\alpha}_p$ Klassifikation. b) Klassifikation nach erster WISHART-Iteration. c) nach zweiter WISHART-Iteration. d) nach 5 WISHART-Iterationen. e) nach 10 WISHART-Iterationen. f) Unüberwachte WISHART-Klassifikation in 16 Klassen durch Zuhilfenahme der Anisotropie (10 Iterationen) [53]	57
3.7	Verschiedene Aufnahmen einer landwirtschaftlichen Fläche. Oben: Spurbild. Mitte: Alpha-Winkel. Unten: Polarimetrische Entropie. Links: Volle Auflösung. Rechts: 3 verschiedene Subaperturaufnahmen bei den Squintwinkeln -3.5° , 0.0° und $+3.5^\circ$	60

3.8	a) Beispiel einer periodischen Oberfläche mit zufälligen Störungen. b) Position von Resonanzen in der (θ, φ) -Ebene.	61
3.9	Links: Logarithmus des Maximum-Likelihood Verhältnisses. Rechts: Karte der nichtstationären Pixel, hier dargestellt in weiß.	62
3.10	Nummer der Subapertur mit der geringsten Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zur Statistik der 8 ursprünglichen Subaperturen. Stationäre Pixel sind in grau dargestellt.	63
3.11	Polarimetrische Parameter eines einzelnen landwirtschaftlichen Feldes in voller Auflösung, nach Eliminierung anisotroper Subaperturen.	65
3.12	Nummer der Subapertur mit der geringsten Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zur Statistik der 8 ursprünglichen Subaperturen. Stationäre Pixel sind in grau dargestellt.	66
3.13	a) Bildamplitude in PAULI-Darstellung (9 Looks). b) Entropie-Alpha Klassifikation. c) Klassifikation in 8 Klassen mit Wishart k-means. d) Klassifikation in 8 Klassen mit Wishart Expectation Maximisation.	69
3.14	Blockdiagramm der unüberwachten polarimetrischen Klassifizierung über Expectation Maximisation kombiniert mit probabilistischer Relaxation der Klassen. . .	73
3.15	Klassifikationsergebnisse der nachbarschaftsgestützten Expectation Maximisation mit verschiedenen Graden von Nachbarschaftswahrscheinlichkeiten. a) Bildamplitude. b) identische Nachbarschaftswahrscheinlichkeiten. c) Gleiche Nachbarklasse doppelt so wahrscheinlich wie andere Klasse. d) fünf mal so wahrscheinlich. e) 10 mal so wahrscheinlich. f) 100 mal so wahrscheinlich.	75
3.16	Klassifikationsergebnisse der nachbarschaftsgestützten Expectation Maximisation mit verschiedener Anzahl von Nachbarschaftsiterationen. a) eine Iteration. b) zwei Iterationen. c) drei Iterationen. d) fünf Iterationen e) 10 Iterationen f) 20 Iterationen.	76
3.17	Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten $\ p_q^{(k)} - p_q^{(k-1)}\ $ bei verschiedenen Kompatibilitätskoeffizienten (vergl. Abb. 3.15)	77
3.18	Konvergenz der Verbundwahrscheinlichkeiten $\ p_q^{(k)} - p_q^{(k-1)}\ $ bei verschiedener Anzahl von Nachbarschaftsiterationen (vergl. Abb. 3.16)	77
4.1	Abbildungsgeometrie der SAR Interferometrie.	82
4.2	Der Vulkan Ätna/Sizilien, abgebildet mit dem interferometrischen Repeat-Pass Sensor SIR-C/X-SAR. a) Amplitude des Interferogramms. b) Interferometrische Phase. c) Interferometrische Phase nach Fläche-Erde Korrektur. d) Interferometrische Kohärenz	84
4.3	Abbildung eines Erdbebens mit differentieller Interferometrie. Rechts: Konventionelles Interferogramm nach Fläche-Erde-Korrektur (Überlagerung Phase / Amplitude). Links: Differentielles Interferogramm nach Abzug der topographischen Komponente.	87
4.4	Links: Fehlerhafte Lokalisation der Impulsantwort durch Restbewegungsfehler. Rechts: Abhängigkeit des effektiven Restbewegungsfehlers von der Entfernung. .	89
4.5	SAR Interferogramm mit unkompensierten Restbewegungsfehlern.	90
4.6	Links: Variation des Bewegungsfehlers mit der Abweichung der Topographie von der Referenzhöhe. Rechts: Abhängigkeit der Bewegungskompensation vom aktuell prozessierten Squintwinkel.	92

4.7	Restfehler durch topographische Effekte in der Bewegungskompensation. Links: Fehler bei 10m horizontalem Bewegungsfehler und variabler Abweichung von der Referenzhöhe. Rechts: Fehler bei 100m topographischer Abweichung und variablem horizontalen Bewegungsfehler.	92
4.8	Zusammenhang zwischen interferometrischer Basislinie und Bewegungskompensationstermen.	93
4.9	Blockdiagramm der topographieadaptiven Bewegungskompensation.	95
4.10	Topographieadaptive Bewegungskompensation. a) Bildamplitude. b) Kohärenz bei Bewegungskompensation auf Referenzebene. c) Kohärenz bei Bewegungskompensation auf mittlere Topographie des Pulses. d) Kohärenz bei Anwendung von voller topographieadaptiver Bewegungskompensation. e) Phasendifferenz der Slaveaufnahme zu Zeitbereichsergebnis bei Bewegungskompensation auf mittlere Topographie des Pulses. f) Phasendifferenz der Slaveaufnahme zu Zeitbereichsergebnis bei voller topographieadaptiver Bewegungskompensation.	97
4.11	Links: Abbildung von verschiedenen Abschnitten des Restbewegungsfehlers auf einen gegebenen Teil der Szene durch Subapertur-Prozessierung. Rechts: Verbesserte Multisquint-Prozessierung; der Basislinienfehler an einer niederkohärenten Azimutposition kann aus umliegenden, kohärenteren Bereichen bestimmt werden.	101
4.12	Vergrößerung kohärenter Regionen durch Multisquint-Prozessierung. a) $\partial E/\partial x$ nach Verarbeitung der ersten Subapertur, b) nach 1/3 der Subaperturen, c) Endergebnis. d) - f) zu Ergebnissen der oberen Zeile gehörigen Gewichtungen \mathbf{W} (Standardabweichung der differentiellen Phase)	101
4.13	Ergebnisse der flugzeuggestützten SAR Interferometrie, Testgebiet: Beilngriess. a) SAR Amplitude. b) Geländetopographie, abgeleitet aus SRTM Daten. c) Interferometrische Kohärenz. d) Interferometrische Phase. e) Aus Daten geschätzter Restbewegungsfehler. f) Um Bewegungsfehler korrigierte interferometrische Phase. g) Aus dem Höhenmodell abgeleitete, zu erwartende synthetische Phase. h) Differenz aus synthetischer und interferometrischer Phase. i) Differenz nach Korrektur konstanter und linearer Terme.	106
4.14	Ermittelte Restbewegungsfehler in horizontaler und vertikaler Richtung, bei iterativer Anwendung der Multisquint-Prozessierung (ohne konstante und lineare Komponenten).	107
4.15	Korrektur von Restbewegungsfehlern. a) unkorrigiertes Interferogramm. b) synthetische Phase aus SRTM Höhenmodell (fehlerbehaftet). c) ermittelte Phasenkorrektur. d) korrigiertes Interferogramm.	108
4.16	Aktualisierung fehlerhafter bzw. niedrigauflösender Höhenmodelle. a) Ausschnitt aus SRTM Höhenmodell mit deutlichen Höhenfehlern. b) Aktualisiertes Höhenmodell. Die glatte Topographie des Geländes wird nun deutlich erkennbar.	109

D Tabellenverzeichnis

2.1	Parameter der simulierten Rohdatenszenarien	41
2.2	Simulationsergebnisse der erweiterten Wellenzahlprozessierung	42

Index

- a-posteriori Wahrscheinlichkeit, 69
- A-priori Wahrscheinlichkeiten, 56
- AIRSAR, 8–10
- Along-Track Interferometrie, 10
- ALOS-PALSAR, 9
- Alpha-Winkel, 66
- Alpha-Winkel, 52, 53, 59
- Anisotrope Rückstreuung, 58
- anisotrope Rückstreuung, 59, 64
- Anisotropie, 55
- Antennendiagramm, 13, 15
- Atmospheric Phase Screen, 87
- Azimutauflösung, 13–15, 20
- Azimutexpansion, 34
- Basislinie, 81, 93
- Basismatrizen, 49
- Bayes'sches Theorem, 56
- Beugungslimit, 14
- Bewegungsfehler, 23, 24
- Bewegungskompensation, 24, 30, 35, 91
 - 1. Ordnung, 25
 - 2. Ordnung, 25
 - 3. Ordnung, 36
 - topographieabhängig, 94
 - Winkelabhängigkeit, 38
- Bragg-Resonanz, 59, 61, 64, 66
- Chirp, 13
- Chirp-Scaling Algorithmus, 26
- Chirprate, 35
- Deterministische Streuer, 51
- Dielektrizitätskonstante, 8
- Differentielle Interferometrie, 86
- Differentielle Phase, 86
- Differentielle SAR Interferometrie, 10
- Dipolstreuung, 52
- Diskriminator, 56, 57
- Doppelreflektion, 52
- Doppler-Phase, 17
- Dopplerbandbreite, 35
- Dopplerfrequenz, 11, 91
- Dopplerverschiebung, 7
- E-SAR, 8, 9
- Eigenvektorzerlegung, 51
- Elliptizität, 48
- Entfernungsauflösung, 13, 83
- Entfernungsbandbreite, 13, 35
- Entropie, 52, 53, 59, 66
- Entropie-Alpha Klassifikation, 53, 55, 69
- ENVISAT, 8
- ERS-1/2, 8, 10
- Erweiterte Wellenzahlprozessierung, 31
- Expectation Maximisation, 67
- Extended Chirp-Scaling Algorithmus, 26
- Fast Factorized Back-Projection, 26
- Fehlalarmrate, 62
- Fernbereich, 24
- Flächenstreuer, 51
- Flache Erde, 84
- Freiheitsgrade, 47
- Fuzzy-Logic, 67
- Gauss'sche Umgebung, 74
- Geoinformationssysteme, 72
- Höhenmodelle, 10
- Homogenisierung, 74, 78
- Initialisierung, 58, 68
- Interferenz, 59
- Interferometrie, 10
- ISODATA, 56
- Jonesvektor, 47
- K-means Algorithmus, 68
- Klassenzentrum, 58, 68
- Klassenzugehörigkeit, 67, 69, 71

- Klassifikation, 52, 67, 74
- Kohärenz, 85
- Kohärenzmatrix, 51
- Kompatibilitätskoeffizienten, 71, 72
- Korrelationskoeffizient, 51
- Kovarianzmatrix, 51
- Kritische Basislinie, 83

- Lexikographische Basis, 49
- Likelihood-Funktion, 68

- Maximum-Likelihood Verhältnis, 61, 63
- Merkmalsraum, 53, 56
- MTI, 11
- Multifrequentes SAR, 8
- Multilooking, 21
- Multisquint-Prozessierung, 98

- Nachbarschaftsfunktion, 71, 74
- Nahbereich, 24

- Oberflächenrauigkeit, 8
- Oberflächenstreuung, 52
- Orientierungswinkel, 48
- Orthogonale Streumechanismen, 50

- Pauli-Basis, 49, 52
- Permanent Scatterers, 12, 87
- Phase Unwrapping, 85
- Phasenabwicklung, 85
- Phasendifferenz, 82
- Point Reduction Theorem, 52
- Polarimerische SAR Interferometrie, 10
- Polarimetrie, 9, 47
- Polarimetrische SAR Interferometrie, 47
- Polarimetrische Signatur, 49
- Postklassifikation, 71
- Probabilistische Relaxation, 70
- Pulsdauer, 13
- Punktziel, 11

- Räumlicher Kontext, 67
- räumlicher Kontext, 67, 71, 78
- Radar-Stereogrammetrie, 82
- RADARSAT, 8, 9, 11
- Radiating-Reflector Modell, 27
- RAMSES, 8
- Range Cell Migration, 17
- Range-Doppler Algorithmus, 26

- Rangedelay, 16
- Rayleigh-Kriterium, 14
- Referenzfunktion, 18, 21
- Referenzhöhe, 90
- Referenztrack, 24
- Reflektivität, 16, 18, 83
- Restbewegungsfehler, 88, 89, 98
- Reziproke Rückstreuung, 48

- SAR Interferometrie, 10, 81
 - differentielle, 86
- SAR Polarimetrie, 9
- SAR Prinzip, 14
- Schrägentfernung, 81
- Sinclairmatrix, 48
- SIR-C/X-SAR, 8, 9
- SLAR, 7
- Speckle, 21, 67, 72
- Speckle-Effekt, 21
- Spur, 59, 64
- Squintwinkel, 11, 17
- SRTM, 8, 10
- Störpixel, 74
- STAP, 11
- Stationarität, 62
- Streumechanismus, 53
- Stolt-Mapping, 30, 31, 34
- Strömungsgeschwindigkeit, 10
- Streifenbreite, 24
- Streuamplitude, 50
- Streuentropie, 52
- Streumatrix, 48
- Streuvektor, 49
- Subaperturen, 11, 22, 59, 61
- Symmetrische Streuer, 48
- Synthetische Apertur, 19

- Temporale Dekorrelation, 85
- TerraSAR-X, 8, 9, 11
- Tomographie, 12
- Topographische Phase, 83
- Trainingsgebiete, 68

- Unüberwachten Klassifikation, 52

- Verbundwahrscheinlichkeit, 71
- Verkehrsbeobachtung, 11
- Versteckte Variable, 68
- Volumendekorrelation, 85

Weglängenunterschied, 83
Wellenzahlprozessierung, 28
Wishart Klassifikation, 56
Wishart Verteilung, 56
Wishart-Verteilung, 56, 68

Zeit-Frequenz Analyse, 11
Zeit-Frequenz Auflösung, 96
Zielentfernung, 13
Zielentfernungsänderung, 17
Zufallsinitialisierung, 69